

THIAGO FERREIRA MARTINS

ESTUDO DO EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA JUNTA SOLDADA DO AÇO API 5L X80

SÃO PAULO

2015

THIAGO FERREIRA MARTINS

ESTUDO DO EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA JUNTA SOLDADA DO AÇO API 5L X80

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para conclusão de curso de
Especialização em Engenharia de
Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

2015

*O sucesso é mensurado não pela posição
que uma pessoa alcança, mas pelos
obstáculos que ela teve que vencer.*

Booker T. Washington

Aos meus pais Regina e Eliel

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, saúde e oportunidade concedida. Ao meu Orientador Professor Doutor Sérgio Duarte Brandi pela grande oportunidade, companheirismo, incentivo, ideias, pelos inúmeros cafés.

Aos meus pais, Regina Ferreira Martins e Eliel Rodrigues Martins, por todo incentivo, amor, carinho, paciência e lutas.

À minha noiva Bruna Taiara da Silva Bastos que sempre me incentivou e esteve ao meu lado.

Aos meus colegas do Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que se tornaram grandes amigos, Jaime Casanova Soeiro Júnior, Dario Magno Batista Ferreira, Antonio do Nascimento da Silva Alves, Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto, Evandro Armini de Pauli, Anderson Clayton Nascimento Ribeiro, Dany Michell Andrade Centeno, Rafael Rocha Maia, Laura Borges Abrantes, Mario Henrique de Paula Iacono e Diogo Soares Oliveira pelos incentivos, estudos, risos, choros, piadas, horas de lazer, feijoadas e muitos cafés.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP José Rubens Beserra de Carvalho, Danilo Filho e Antônio Lívio da Silva Nunes.

Ao meu grande amigo Sr. Ademir dos Santos Félix (Miro), um excelente Soldador, que sempre me incentivou a realizar este trabalho.

À Lincoln Electric que gentilmente cedeu suas instalações e seus soldadores para a realização da soldagem do Tubo API 5L X80.

Ao Sr. José Edenil Gomes dos Santos, pelos ensaios destrutivos realizados na LabTeste.

À Voith Hydro pelos ensaios mecânicos, em especial ao Alexandre Bueno, Flávio Vanderlei Gonçalves Silva, Thiago Viana de Oliveira Turra, Paulo Cezar de Carvalho e Dielson Rafael Lima da Silva.

RESUMO

A utilização de tubos de aços de alta resistência e baixa liga é comumente o mais indicado, segundo a API 5L, para o transporte de óleo e de gás sob pressão. Em vista da necessidade de aumentar a eficiência no transporte e fabricação de tubulações, inúmeras pesquisas têm sido realizadas para desenvolvimento de materiais e juntas soldadas mais resistentes, que possibilitam a redução da espessura do material e aumento da pressão de trabalho. Neste sentido, foram realizados, neste trabalho, tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, com o objetivo de se obterem as melhores propriedades mecânicas nas juntas soldadas. O material utilizado foi o tubo API 5L X80 com diâmetro de 40 polegadas e 16 mm de espessura. Foi realizada a soldagem circunferencial com passe de raiz pelo processo MIG/MAG com curto circuito controlado, gás de proteção 80% Ar e 20% CO₂, enchimento e acabamento pelo processo de soldagem com arame tubular e gás de proteção 75% Ar 25%CO₂. Os consumíveis utilizados no passe de raiz foram ER80S-G e nos passes de enchimento e acabamento o E101T1GM-H8. Realizaram-se quatro tratamentos térmicos de têmpera e revenimento por 2 horas. Para analisar os resultados, ensaios de tração, microdureza e ensaios de impacto Charpy a temperaturas de -40°C e 0°C no metal de solda e ZAC. Os tratamentos térmicos realizados não influenciam, estatisticamente, nas propriedades mecânicas das juntas soldadas em relação a condição como soldado.

ABSTRACT

The use of high strength low alloy steels tubes is commonly the most appropriate for transporting oil and gas under pressure, according to API 5L. In view of the need to increase efficiency in the transportation and manufacturing pipes, numerous studies have been conducted to develop materials and more resistant welded together, enabling the reduction of the material thickness and increased work pressure. It has been carried out, in this work, heat treatment of quenching and tempering, with the objective of obtaining the best mechanical properties in the welded joints. The material was API 5L X80 pipe with a 40 inch diameter and 16 mm thick. The circumferential welding pass root was done by GMAW with *controlled short circuit transfer*, shielding gas 80%Ar and 20% CO₂. Filling and finishing passes were welded with FCAW using a shielding gas 75% Ar and 25% CO₂. Consumables used in the root pass were ER80S-G and in the filling and finishing passes E101T1GM-H8. There were done four heat treatments of quenching and tempering for 2 hours. The results were analyzed by tensile test, hardness and Charpy V impact tests at temperatures of -40 ° C and 0 ° C in the weld metal and HAZ. The heat treatments did not influence statistically on the mechanical properties of welded joints related to as welded condition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Evolução das vendas nacionais, pelas distribuidoras, dos principais derivados de petróleo de 2003 a 2012 [1]	15
Figura 1-2 Mapeamento dos gasodutos no Brasil	16
Figura 3-1 Efeito da microestrutura para aumentar as propriedades de resistência e tenacidade [5]	23
Figura 3-2 Rotas de processamento dos aços ARBL [6]	29
Figura 3-3 Esquema do equipamento de soldagem MIG/MAG [15]	31
Figura 3-4 Curva de tensão x corrente de uma fonte de tensão constante [15]	32
Figura 3-5 Variações dos parâmetros de soldagem em relação ao stick-out [15]	33
Figura 3-6 Esquema do equipamento de soldagem AT [15]	35
Figura 3-7 Esquema do AT Autoprotégido, Corte transversal do consumível AT e AT com gás de proteção [15]	36
Figura 4-1 Esquema da junta soldada indicando as camadas e os passes de solda	39
Figura 4-2 Corpo de prova para ensaio de tração [17]	41
Figura 4-3 Disposição dos corpos de prova de ensaio de impacto Charpy, ao centro do metal de solda e na Zona Afetada pelo Calor (ZAC).	42
Figura 4-4 Esquema da retirada dos resultados de microdureza das juntas soldadas.	43
Figura 5-1 Diluição da junta Sem TT	45
Figura 5-2 Diluição da junta TT 1000/500	46
Figura 5-3 Diluição da junta TT 1000/650	46
Figura 5-4 Diluição da junta TT 900/500	47
Figura 5-5 Diluição da junta TT 900/650	47
Figura 5-6 Área da ZAC da junta Sem TT	49
Figura 5-7 Área da ZAC da junta TT 1000/500	49
Figura 5-8 Área da ZAC da junta TT 1000/650	50
Figura 5-9 Área da ZAC da junta TT 900/500	50
Figura 5-10 Área da ZAC da junta TT 900/650	51
Figura 5-11 Microestrutura em três dimensões do aço API 5L X 80 ampliada em 200x.	52
Figura 5-12 Microestrutura em três dimensões do aço API 5L X80 ampliada em 500x	52
Figura 5-13 Microestrutura em três dimensões do aço API 5L X80 ampliada em 1000x	53
Figura 5-14 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, do metal de base realizadas em cada condição de tratamento térmico	54
Figura 5-15 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, do metal de solda realizadas em cada condição de tratamento térmico	55
Figura 5-16 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, da região de grãos grosseiros realizadas em cada condição de tratamento térmico.	56
Figura 5-17 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, da região de grãos refinados realizadas em cada condição de tratamento térmico.	57

Figura 5-18 Limite de resistência para cada condição de tratamento térmico. A linha na cor vermelha representa o limite de escoamento mínimo exigido pela norma API 5L para classificação do metal de base.....	59
Figura 5-19 Mapa de microdureza da junta soldada em condições Sem TT.	60
Figura 5-20 Perfil de microdureza de raiz do CP Sem TT	61
Figura 5-21 Perfil de microdureza do enchimento da junta Sem TT.	62
Figura 5-22 Perfil de microdureza de acabamento Sem TT	63
Figura 5-23 Mapa de microdureza da junta soldada em condições TT 900/650.....	63
Figura 5-24 Perfil de microdureza do passe de acabamento da junta soldada TT 900/650.....	65
Figura 5-25 Perfil de microdureza do passe enchimento da junta soldada TT900/650	66
Figura 5-26 Perfil de microdureza do passe de raiz da junta soldada TT 900/650 ...	67
Figura 5-27 Mapa de microdureza do passe de raiz de junta API 5L X80 [18]	68
Figura 5-28 Perfil de microdureza somente do passe de raiz [18]	69
Figura 5-29 Mapa de microdureza da junta 900/500	70
Figura 5-30 Perfil de microdureza da região do passe de raiz da junta soldada TT900/500.	71
Figura 5-31 Perfil de microdureza da região do cordão de solda de enchimento da junta soldada TT 900/500.....	72
Figura 5-32 Perfil de microdureza da região do cordão de solda de acabamento da junta soldada TT 900/500.....	73
Figura 5-33 Mapa de microdureza das regiões da raiz, enchimento e acabamento da junta TT 1000/500.	74
Figura 5-34 Perfil de microdureza da raiz da junta TT 1000/500	75
Figura 5-35 Perfil de microdureza do enchimento da junta TT 1000/500.....	76
Figura 5-36 Perfil de microdureza do acabamento da junta TT 1000/500	77
Figura 5-37 Mapeamento microdureza de raiz, enchimento e acabamento da junta TT 1000/650.....	77
Figura 5-38 Perfil de microdureza da região do passe de raiz da junta TT 1000/650	78
Figura 5-39 Perfil de microdureza do passe de enchimento da junta TT 1000/650 ..	79
Figura 5-40 Perfil de microdureza da região do passe de acabamento da junta TT 1000/650.....	80
Figura 5-41 - Resultado do ensaio Charpy a -40°C no metal de solda	82
Figura 5-42 Resultado do ensaio Charpy a 0°C no metal de solda	86
Figura 5-43 Resultado do ensaio Charpy a -40°C na ZAC	89
Figura 5-44 Resultado do ensaio Charpy a 0°C na ZAC	93
Figura 5-45 Comparação de resultados dos Ensaio Charpy do MS a -40°C e 0°C.	94
Figura 5-46 Comparação de resultados dos Ensaio Charpy da ZAC a -40°C e 0°C	94
Figura 5-47 Comparação de resultados dos ensaios Charpy do MS e ZAC a -40°C	95
Figura 5-48 Comparação dos resultados dos ensaios Charpy do MS e ZAC a 0°C .	96

Figura 5-49 Comparação entre os resultados dos ensaios Charpy a 0°C e -40°C e os tratamentos térmicos.....	96
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 Composição do Aço API 5L X80, segundo a especificação API 5L. [4] ..	22
Tabela 3-2 Propriedades mecânicas dos Aços API 5L X80 [4].....	26
Tabela 4-1 Composição do Aço API 5L X80 utilizado neste estudo.	38
Tabela 4-2 Temperaturas aplicadas para os tratamentos térmicos	40
Tabela 4-3 Temperaturas de realização do ensaio e identificação dos corpos de prova	42
Tabela 5-1 Parâmetros de soldagem do tubo API 5L X80.....	44
Tabela 5-2 Diluição das juntas soldadas do tubo API 5L X80	45
Tabela 5-3 Resultados das áreas das ZAC segundo as macrografias.	48
Tabela 5-4 Resultados do ensaio mecânico de tração	58
Tabela 5-5 Resultado de microdureza realizado na região do passe de raiz da junta Sem TT.....	60
Tabela 5-6 Resultado de microdureza realizado na região do passe de enchimento em CP Sem TT.	61
Tabela 5-7 Resultado de microdureza realizado na região do passe de acabamento em CP Sem TT.	62
Tabela 5-8 Resultado de microdureza realizada no passe de acabamento da junta TT 900/650	64
Tabela 5-9 Resultado de microdureza realizada no passe de enchimento da junta TT 900/650	66
Tabela 5-10 Resultado de microdureza realizada na raiz da junta TT 900/650	67
Tabela 5-11 Resultados da microdureza somente do passe de raiz [18]	69
Tabela 5-12 Resultados de microdureza na região da raiz da junta TT900/500.	71
Tabela 5-13 Resultados de microdureza na região do enchimento da junta TT 900/500.	72
Tabela 5-14 Resultados de microdureza na região do acabamento da junta TT 900/500.....	73
Tabela 5-15 Resultado de microdureza da raiz da junta TT 1000/500	74
Tabela 5-16 Resultado de microdureza do enchimento da junta TT 1000/500	75
Tabela 5-17 Resultado de microdureza do acabamento da junta TT 1000/500.....	76
Tabela 5-18 Resultados de microdureza da região do passe de raiz da junta TT 1000/650	78
Tabela 5-19 Resultados de microdureza da região dos passes de enchimento da junta TT 1000/650.....	79
Tabela 5-20 Resultados de microdureza da região do passe de acabamento da junta TT 1000/650.....	80
Tabela 5-21 Resultados do ensaio de impacto Charpy realizados no MS a -40°C ...	81
Tabela 5-22 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados no MS a -40°C.....	83
Tabela 5-23 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados no MS a -40°C.....	83
Tabela 5-24 Dados Teste Tukey	83

Tabela 5-25 Diferença e igualdade entre os resultados do ensaio de impacto Charpy "V" do MS a -40°C	84
Tabela 5-26 Resultado do Ensaio de Impacto Charpy realizado no MS a 0°C	85
Tabela 5-27 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados no MS a 0°C	86
Tabela 5-28 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados no MS a 0°C	87
Tabela 5-29 Resultados do Teste de Tukey referentes aos dados do ensaio de impacto Charpy realizado no MS a 0°C	87
Tabela 5-30 Resultado dos Ensaos de Impacto Charpy realizados na ZAC a -40°C	88
Tabela 5-31 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados na ZAC a -40°C	89
Tabela 5-32 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados na ZAC a -40°C	90
Tabela 5-33 Resultados TT1000/500 e TT1000/650	90
Tabela 5-34 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados na ZAC a -40°C – TT 1000/500 e TT 1000/650	91
Tabela 5-35 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados na ZAC a -40°C - TT 1000/500 e TT 1000/650	91
Tabela 5-36 Resultado dos Ensaos de Impacto Charpy realizados na ZAC a 0°C ..	92
Tabela 5-37 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados na ZAC a 0°C	93
Tabela 5-38 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados na ZAC a 0°C	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ANP	Agência Nacional do Petróleo
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
HSLA	High Strength Low Alloy
MPa	Megapascal
ASM	American Society for Metals
API	American Petroleum Institute
TMCP	Thermomechanical Control Process
TMP	Thermomechanical Rolling
RA	Resfriamento acelerado
AC	Accelerate Cooling
DQ&T	Direct Quenched and Tempered
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
V	Volts
A	Ampères
mm	milímetros
s	segundos
in	inch
AT	Arame Tubular
V _m	Velocidade média
Vel	Velocidade
kJ	kilojoules
Comp	Comprimento
TT	Tratamento Térmico
TIG	Tungsten Inert Gas
HV	Hardness Vickers
J	Joules
F	Fisher
gl	Graus de liberdade
SQ	Soma dos quadrados

MB	Metal de base
ZAC	Zona Afetada Pelo Calor
MS	Metal de Solda
ZDL	Zona de Ligação
MQ	Média dos quadrados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1. Aços ARBL.....	19
3.1.1. Histórico	19
3.1.2. Aplicações	20
3.1.3. Classificação	20
3.2. Tubos API 5L X80	21
3.2.1. Processos de fabricação	21
3.2.2. Composição química dos Tubos API 5L X80	22
3.2.6. Propriedades mecânicas	26
3.2.7. Mecanismos de endurecimento	27
3.2.7.1. Rota de fabricação TMCP	27
3.2.7.2. Têmpera e Revenimento	29
3.3. Soldabilidade	30
3.3.1. Trinca induzida por hidrogênio.....	30
3.4. Processo de soldagem MIG/MAG	30
3.4.1. Equipamento de soldagem.	31
3.5. Processo de soldagem Arame Tubular	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1. Material de base	38
4.2. Soldagem dos tubos	38
4.3. Tratamentos térmicos	40
4.4. Macrografia	40
4.5. Micrografia	40
4.6. Ensaio de Tração	41
4.7. Ensaio de Impacto Charpy com entalhe em V.....	41
4.8. Microdureza	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.3. Ensaio de tração	58
5.4. Microdureza Vickers (HV 0,5)	59

5.5. Ensaio de impacto Charpy "V".....	81
6. CONCLUSÕES	98
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética no Brasil, motivada pelo consumo da população, incentivou a ampliação de malhas dutoviárias, com o objetivo de aumentar a eficiência nos transportes de óleo, gás natural e minérios, segundo o Anuário da ANP (Agência Nacional do Petróleo), desde 2004 até 2013. A figura 1-1 apresenta a evolução das vendas nacionais entre os períodos de 2003 e 2012. [1]

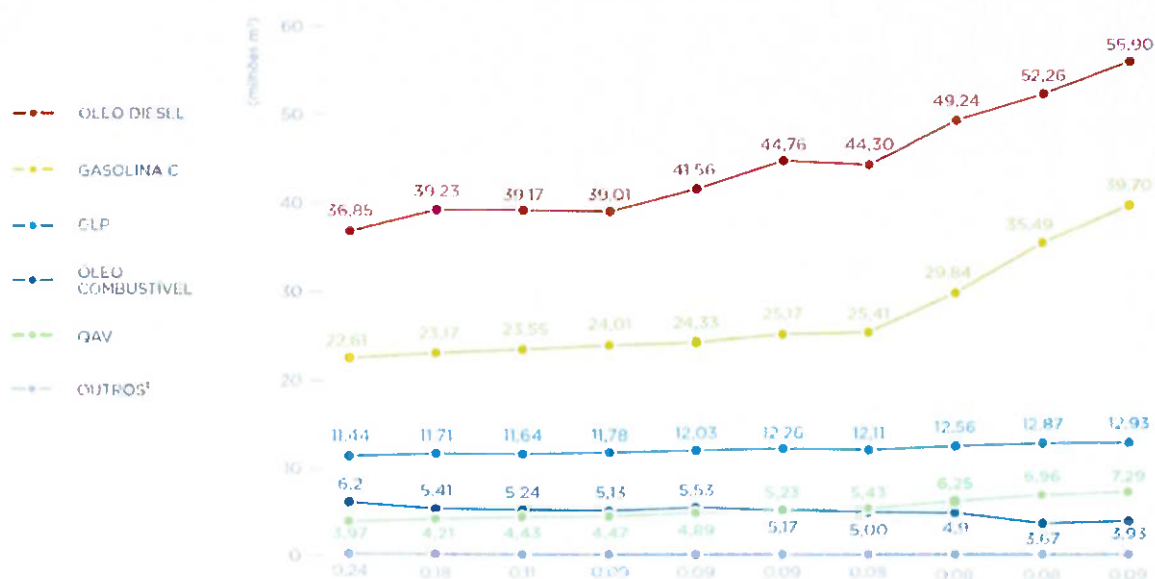


Figura 1-1 Evolução das vendas nacionais, pelas distribuidoras, dos principais derivados de petróleo de 2003 a 2012 [1]

A pesquisa para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e com menores massas para o transporte de derivados de petróleo advindos de plataformas e/ou refinarias foi impulsionada. [1]

No ano de 2012, a importação de petróleo no Brasil reduziu 6% em relação ao ano anterior [1]. Conclui-se que: com o aumento crescente do consumo de combustíveis e a redução da importação, o Brasil está dando passos no sentido de se obter a autossuficiência em petróleo. Desta forma, a necessidade de meios de transportes de derivados de petróleo mais eficientes que o rodoviário aumentou, como é o caso dos oleodutos e gasodutos.

produção e refino de petróleo e, conseqüentemente, a capacitação e o aperfeiçoamento dos recursos humanos.

A montagem de tubulações pode ser realizada através de diversos processos de união, como por exemplo, rosqueamento, flangeamento e soldagem. Dentre esses processos, o mais indicado para unir tubos de grandes diâmetros, capazes de resistir a pressões elevadas, atender a tensões de projeto, requisitos de tenacidade, garantia de estanqueidade, de acordo com as normas de fabricação, é a soldagem.

Em virtude da demanda por produtividade, qualidade, redução de custos, segurança, minimização de impactos ambientais, novos materiais têm sido desenvolvidos e, conseqüentemente, processos mais eficientes e complexos de soldagem tem sido alvos de pesquisa e desenvolvimento em universidades, institutos de pesquisas e empresas do setor.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é identificar o melhor tratamento térmico para obter as melhores propriedades mecânicas em juntas soldadas através dos ensaios de tração, dureza e impacto Charpy com entalhe em "V", a 0°C e -40°C.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços ARBL

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) ou o equivalente em inglês HSLA (*High Strength Low Alloy*), também conhecidos como aços microligados, são ligas de ferro carbono que possuem boas propriedades mecânicas e/ou resistência à corrosão atmosférica, comparadas aos aços carbono comum, como o A36. Seus limites de escoamento são maiores ou iguais 40 ksi ou 275 MPa [2], enquanto que o A36 possui limite de escoamento, segundo a norma ASTM A36, de 36 ksi ou 250 MPa [3].

A satisfatória soldabilidade e formabilidade destes aços são alcançadas a baixas quantidades de carbono (C), cujos teores variam entre 0,5% a 0,25% e teores de manganês limitados ao máximo de 2,0%. Entre outros elementos químicos presentes, estão o Cromo (Cr), Níquel (Ni), Molibdênio (Mo), Cobre (Cu), Nitrogênio (N), Vanádio (V), Nióbio (Nb), Titânio (Ti) e Zircônio (Zr), os quais podem ser utilizados através de diversas combinações [2].

3.1.1. Histórico

Os aços ARBL foram descobertos no final da década de 30 início da década de 40 devido a utilização de elementos microligantes, em pequenas quantidades. A utilização destes elementos tinha como a finalidade de alcançar e garantir o mínimo de limite de escoamento requerido pelo código de projeto [2].

Em meados de 1960 e 1965 iniciaram-se as pesquisas e desenvolvimento com os mecanismos de endurecimento, laminação a quente. Na época, estes estudos tinham como objetivo a substituição de aços tratados termicamente [2].

Em 1965 a 1972, houve a busca pela melhoria da tenacidade dos aços ARBL, com a realização de testes de refinamento de grão e dessulfuração, aços laminados a quente, chapas, aços para tubulações, perfis estruturais e desenvolvimento da laminação controlada [2].

Entre 1970 e 1976 tinham como foco a soldabilidade e formabilidade dos aços atuando na redução de carbono, carbono equivalente, redução do teor de enxofre, controle das formas de inclusão no aço [2].

Desde 1972 até os dias atuais foco em propriedades secundárias como controle da fratura dúctil-frágil, fadiga, resistência a corrosão por H₂S, comportamento do escoamento do material e formabilidade [2].

De 1979 até hoje, o foco é a reformulação dos aços ARBL devido a disponibilidade ou falta de disponibilidade de alguns elementos de liga. Isto despertou interesse e incentivou desenvolvedores de liga [2].

A tendência para o futuro está na busca por altas resistências de materiais, com foco na redução de custos de matéria prima e redução dos processos de produção [2].

3.1.2. Aplicações

Os aços ARBL são utilizados na fabricação de tubulações de transporte de fluidos da indústria de óleo e gás, navios, estruturas offshore, indústrias automobilísticas, vasos de pressão e equipamentos pesados em geral [2].

São fornecidos, normalmente, à indústria de transformação, em condições de “como laminados”. Todavia, os aços podem ser entregues, mediante acordo entre fornecedor e comprador, em condições de laminação controlada, normalizados ou endurecidos por precipitação. Apesar dessas variações em seu processo de fabricação, os aços ARBL devem conferir as especificações mínimas requeridas [2].

3.1.3. Classificação

Segundo a ASM (*American Society for Metals*) [2], os aços ARBL são divididos em cinco tipos, conforme a seguinte apresentação:

- Aços intempéries (*Weathering steels*): são aços projetados com o objetivo de conferir boa resistência a corrosão atmosférica através da adição de elementos de liga como o cobre e o fósforo.

- Aços microligados de microestrutura ferrita-perlita (*Microalloyed ferrite-perlite steels*): são aços que possuem em sua composição química pequenas adições de elementos formadores de carbonetos e carbonitretos, como o nióbio, vanádio e titânio. Os carbonetos formados por estes elementos agem no endurecimento por

precipitação, refino de grão. O teor de cada elemento geralmente é menor que 0,1% em massa.

- Aços com perlita reduzida: são aços com alta resistência devido aos finos grãos de ferrita e ao endurecimento por precipitação. Esses aços são assim chamados devido à ausência ou pela pequena dimensão da perlita na microestrutura.

- Aços microligados (*Microalloyed steels*): são aços com adição de elementos de microliga como Nb, Ti e V. O teor de cada elemento geralmente é menor que 0,1%. Neste caso, o Nb, Ti e V agem no refino de grão e/ou endurecimento por precipitação de carbonitretos e/ou carbonetos.

- Aços com ferrita acicular: são aços com baixo teor de carbono, com temperabilidade suficiente para a transformação, durante o resfriamento, em ferrita acicular fina de alta resistência ao invés de ferrita poligonal.

- Aços bifásicos (*Dual Phase*): são aços com pequena quantidade de ferrita distribuída uniformemente em regiões de martensita de alto carbono. Isto resulta em baixo limite de escoamento e alta taxa de encruamento. Sendo assim, os aços bifásicos possuem alta resistência mecânica e alta formabilidade quando comparados aos demais aços supracitados.

- Aços resistentes a trinca induzida por hidrogênio (*Hydrogen-induced cracking resistant steels*): são aços com teores de carbono e enxofre reduzidos e adições de teores acima de 0,26% em massa de Cu. As inclusões contidas no material são controladas.

3.2. Tubos API 5L X80

Os tubos API são comumente utilizados na indústria de óleo e gás para o transporte de combustíveis gasosos e/ou líquidos. A API (American Petroleum Institute) regulamenta a fabricação bem como sugere composições químicas e propriedades mecânicas para os aços ABRL utilizados na construção dos tubos. [4]

3.2.1. Processos de fabricação

Os tubos API podem ser fabricados através de um processo de conformação a quente, como por exemplo a extrusão, ou seja, sem costura ou através de um cordão de solda longitudinal, isto é, com costura. [4]

Em tubos com costura, os tubos são fabricados a partir do conceito UOE que consiste na conformação de uma chapa, já chanfrada em suas extremidades, no formato "U", depois em formato "O" e finalmente a "E" designando a expansão a frio. Após o processo de montagem do tubo, o cordão de solda longitudinal é realizado. [4]

3.2.2. Composição química dos Tubos API 5L X80

A especificação API 5L define uma faixa da composição química dos aços utilizados na fabricação de tubos, de acordo com a espessura e presença ou ausência de costura. A tabela a seguir apresenta a composição química típica de um tubo API 5L X80 com costura, fabricado pela rota TMCP, com espessura menor ou igual a 25,0mm [4].

Tabela 3-1 Composição do Aço API 5L X80, segundo a especificação API 5L. [4]

	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Outros	CE _{iw}	CE _{Pcm}
X80	0,12	0,45	1,85	0,025	0,015	-	-	-	-	0,43	0,25

A especificação API 5L determina que, a soma dos teores de Vanádio, Titânio e Nióbio deve ser menor ou igual a 0,15%. Outros elementos de liga podem ser adicionados à composição química conforme os seguintes teores: Cobre (Cu), deve ser menor ou igual a 0,50%; Níquel, menor ou igual a 1,0%; Cromo (Cr), menor ou igual a 0,50%; enquanto o Molibdênio (Mo), menor ou igual a 0,80%. Caso não haja adição intencional de Boro (B), acordada entre comprador e fornecedor, é permitido o teor de 0,001% de B residual. Os teores de elementos de microliga e os demais podem ser alterados conforme acordo entre fornecedor e comprador. [4]

3.2.3. Microestrutura

A microestrutura encontrada em aços de tubo API 5L X80, fabricados pelo processo TMCP com resfriamento acelerado é a ferrita-bainita e perlita ou agregados

ferrita/cementita. A figura 2-1 apresenta graficamente o efeito da microestrutura para melhorar as propriedades mecânicas a partir de um aço X60 até um aço X80 com resfriamento acelerado. [5]

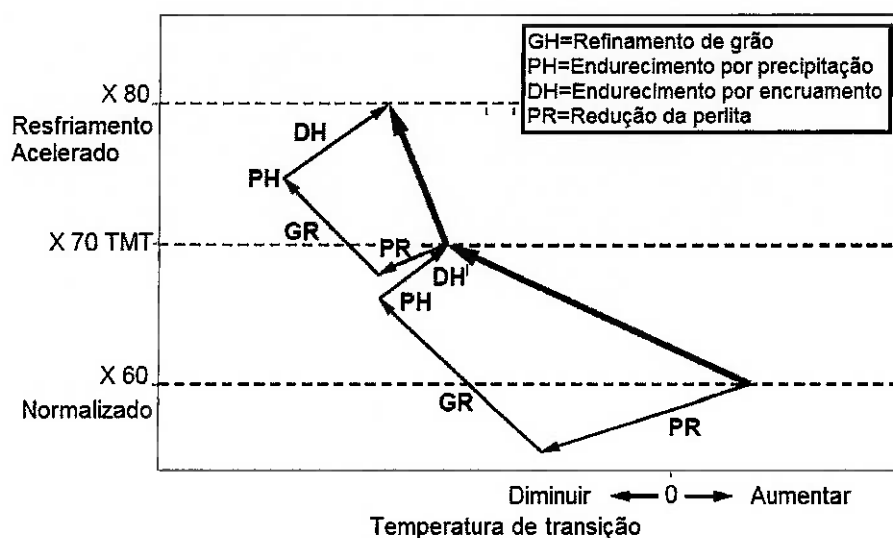


Figura 3-1 Efeito da microestrutura para aumentar as propriedades de resistência e tenacidade [5]

Partindo-se de um aço X60 e, reduzindo sua temperatura de transição, há o refinamento de grão, consequentemente a redução da perlita e o endurecimento por encruamento, alcançando o grau X70.

Desta mesma forma, a partir do X70 pode-se obter o grau X80, reduzindo mais a temperatura de transição com a finalidade de reduzir ainda mais a perlita e alcançar o endurecimento por precipitação durante o resfriamento acelerado, e na última fase, o encruamento por precipitação.

3.2.4. Efeito dos elementos microligantes

Os principais elementos microligantes utilizados em aços ARBL são o Nb, V e Ti. A seguir, foi apresentado o os efeitos destes elementos em estruturas de aços.

O elemento microligante Níóbio (Nb) é utilizado em aços ARBL em pequenas quantidades, em torno de 0,03% a 0,05% em massa. O objetivo de amentar o limite

de escoamento do material é alcançado através da combinação do endurecimento por precipitação e o refino do grão ferrítico. O refino do grão é beneficiado porque o Nb tem baixa solubilidade no campo austenítico, assim retardando o crescimento do grão austenítico. O Nb é o elemento formador de precipitados mais estáveis a temperaturas de laminação que o Vanádio. [2]

O Vanádio (V) também atua no endurecimento por precipitação e refino do grão ferrítico devido a formação de carbonetos e nitretos de vanádio. Esta precipitação de carbonitretos contribui para o aumento da resistência do material e pode ser alcançada na presença de teores entre 0,13% e 0,15% em massa, 1% em massa ou mais de manganês e pelo menos 0,01% em massa de Nitrogênio. No quesito refino de grão, os grãos refinados são gerados pela combinação de vanádio e a laminação controlada. [2]

A utilização do elemento Titânio (Ti) auxilia no endurecimento por precipitação através da formação de nitretos, atuando também no controle de sulfetos no material. Quantidades em torno de 0,025% em massa de Ti são suficientes para conter o crescimento do grão austenítico. O Ti atua também como um forte desoxidante o qual é muito utilizado em aços acalmados. [2]

3.2.5. Efeito dos elementos de liga

Os elementos de liga presentes no API 5L X80 são responsáveis por uma série de efeitos no material. Neste subtópico, cada elemento de liga foi detalhado.

O Carbono (C) é o mais barato e forte elemento endurecedor. Seu teor é diretamente proporcional a quantidade de perlita na microestrutura do aço ARBL, aumentando o limite de escoamento do material. Entretanto, quando utilizado em quantidades excessivas, reduz a soldabilidade e a tenacidade do material. A formação de fases metaestáveis, como a martensita, está ligada diretamente com o aumento do teor de carbono na composição química do material. [2]

O Manganês (Mn) é o elemento endurecedor principal de um aço ARBL, quando aplicado em teores acima de 1% em massa. Atua como endurecedor por solução sólida na microestrutura ferrítica e também diminui a temperatura de transformação da austenita para a ferrita. [2]

O Silício (Si) é um forte elemento desoxidante, com forte atuação em aços fundidos. Sua presença é marcante em aços estruturais totalmente desoxidados, com teores até 0,35% em massa. Este elemento tem feito endurecedor em aços ARBL pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida, aumentando o limite de escoamento do material. Sua quantidade deve ser controlada pois alto teor de Si afeta a tenacidade e a soldabilidade dos aços. [2]

O Cobre (Cu) é um elemento que confere boa resistência a corrosão atmosférica aos aços. Entretanto, a presença do elemento Fósforo (P) em teores superiores a 0,05% em massa contribui para aumentar a eficiência desta resistência a corrosão atmosférica. Teores acima de 0,5% em massa promovem a resistência dos aços ARBL, mas também contribuem para a redução da ductilidade do material, devido ao endurecimento da ferrita. Cerca de 1% em massa de Cu, o limite de escoamento aumenta cerca de 70 MPa a 140 Mpa, considerando o efeito dos outros elementos químicos. [2]

O elemento Fósforo (P) atua como um endurecedor por solução sólida em campo ferrítico. Em grande quantidade, auxilia na resistência a corrosão, principalmente na presença de Cu, conforme citado no parágrafo anterior, mas proporciona queda na ductilidade do material. Entretanto, pode ocorrer, em teores inferiores a 0,05% em massa, a fragilização devido a segregação de P no contorno de grão da austenita anterior. [2]

O Cromo (Cr) atua junto ao Cu em aço com a finalidade de obter melhor resistência a corrosão atmosférica. Isto é visivelmente conferido aos aços intempéries, os quais apresentam composições próximas a 0,12% em massa de P, 0,85% em massa de Cr e 0,40% em massa de Cu. Estes aços possui uma camada aderente de óxido, causado pela exposição a atmosfera, a qual protege a estrutura do meio agressivo.

O Níquel (Ni) atua como endurecedor por solução sólida em fase ferrítica de aços ARBL, podendo ser aplicado em teores de até 1% em massa. Este elemento também auxilia em melhorias na resistência a corrosão atmosférica. Além do mais, em presença de Cu e/ou P, aumenta a resistência a corrosão em ambiente marinho.

O Molibdênio (Mo) promove a dureza do material. Quantidades de Mo entre 0,15% e 0,30% em massa em aços ARBL, aumentando a solubilização do Nb na austenita. Desta forma, pode-se obter carbonitretos de nióbio ((NbC)N) na ferrita. Os

precipitados, como citados anteriormente, aumentam o limite de escoamento do material. [2]

O Zircônio (Zr), muito utilizado para acalmar aços ARBL, com a finalidade de obter estruturas livres de inclusões, como sulfetos. Isto permite o aumento da ductilidade do material. [2]

O elemento Boro (B) não afeta a resistência de um material laminado comum. Entretanto, quando estruturas de ferrita acicular são requeridas, o B promove a dureza do material. Este efeito tem maior eficiência em aços totalmente desoxidados.

O Alumínio foi o primeiro elemento aplicado no controle do crescimento do grão austenítico. Ainda é muito utilizado como desoxidante. Atuante na laminação controlada, mas ainda menos eficiente no refino de grão em relação aos Nb e Ti.

Os Terras raras, localizados na série dos Lantanídeos da tabela periódica, destacam-se o Cério (Ce), Lantânio (La) e o Praseodímio (Pr). Estes elementos atuam no controle de inclusões de sulfetos, os quais são de natureza plástica e afetam diretamente a ductilidade do material. Assim, o papel dos elementos terras raras são produzir sulfetos de Ce, La ou Pr, os quais possuem plasticidade desprezível. [2]

3.2.6. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do tubo API 5L X80, segundo a API 5L, estão apresentadas na tabela 2.2, e são baseadas nos limites de escoamento e de resistência do tubo API 5L X80 [4].

Tabela 3-2 Propriedades mecânicas dos Aços API 5L X80 [4]

Unid.	Limite de Escoamento (mínimo)	Limite de Escoamento (máximo)	Limite de Resistência (mínimo)	Limite de Resistência (máximo)
Mpa	555	705	225	825
ksi	80	102	33	119

A relação entre o limite de escoamento e o limite de resistência (LE/LR) do API 5L X80 é máxima de 0,93. Valores acima desta relação, o material poderá apresentar comportamento frágil, isto é, o limite de escoamento estará próximo ao limite de

ruptura. A maioria dos aços, até o grau X80, apresentam a mesma relação LE/LR de 0,93. Entretanto, acima deste grau, como o API 5L X90 e o API 5L X120, os valores da relação variam entre 0,95 e 0,99 respectivamente. [4]

3.2.7. Mecanismos de endurecimento

Como conhecidos, os aços microligados (ARBL) são obtidos pela combinação entre composição química e os diferentes tratamentos termomecânicos.

Os mecanismos de endurecimento visam alcançar aumento da resistência mecânica e boa tenacidade, ductilidade, formabilidade e soldabilidade. As características microestruturais de um material são diretamente proporcionais em relação as propriedades mecânicas. Já a soldabilidade é geralmente aliada a composição química do material.

As propriedades mecânicas podem ser melhoradas através de diferentes tipos de mecanismos de endurecimentos como: por deslocamento, contorno de grão, solução sólida, precipitação, textura e transformação de fase.

Dentre os diferentes mecanismos citados acima, o endurecimento por contorno de grão é influente pois conforme a redução do tamanho de grão, há o aumento das interfaces, isto é, maior caminho livre médio, dificultando o movimento das discordâncias. Então a variação do tamanho de grão está em função da composição química, rotas e/ou parâmetros de produção.

3.2.7.1. Rota de fabricação TMCP

A rota de fabricação TMCP (*Thermomechanical Control Process*) é o processo de laminação controlada de aços, com objetivo de refinar os grãos, aumentando a resistência do material. A composição química do aço aliada ao reaquecimento do material acima da temperatura de austenitização seguida de laminação e resfriamento, promovem propriedades mecânicas satisfatórias [6]. Os elementos microligantes produzem o aumento da resistência mecânica e tenacidade do material, sem afetar a soldabilidade [7].

O refino de grão pode ser alcançado através de três tipos de precipitação como: precipitados que não dissolvem e se posicionam nos contornos de grão da austenita

durante o aquecimento pré trabalho a quente. Normalmente esse é o Nitreto de Titânio (TiN) e algumas vezes Carbonetos de Nióbio (NbC) e Nitreto de Nióbio (NbN). Há também os precipitados que se dissolvem durante o reaquecimento do material e se precipitam no contorno de grão austenítico durante a laminação a quente, prevenindo a recristalização e o crescimento de grão. Esses precipitados, são normalmente, os NbC e NbN e algumas vezes o Nitreto de Vanádio (VN). Finalmente, os precipitados formados após a laminação, durante o resfriamento, na transformação de austenita para ferrita. Geralmente são os precipitados VN e Carbonetos de Vanádio (VC) e algumas vezes NbC ou TiC. [7]

O processo TMCP pode ser subdividido em três outros processos os quais serão apresentados a seguir [6]:

-TMR (*Thermomechanical Rolling*) - laminação termomecânica: este processo permite a redução do tamanho de grão nas regiões recristalizadas ou não recristalizadas da Austenita e algumas vezes, em regiões bifásicas com austenita e ferrita. Geralmente, uma grande porção da redução por laminação é feita próxima ou abaixo da temperatura na qual a austenita começa a transformar-se em ferrita, durante o resfriamento (Ar_3) e deve envolver a laminação em porções mais baixas de variação de temperatura de região intercrítica bifásica.

-Resfriamento Acelerado (RA) – (*Accelerate Cooling – AC*): são processos em que o controle do resfriamento acelerado ocorre após a laminação com o objetivo de conferir propriedades específicas.

-Têmpera Direta e Revenimento – (*Direct Quenched and Tempered – DQ&T*): é o processo de laminação que confere aos aços uma microestrutura de grãos refinados e aumento da dureza, através da têmpera imediatamente após a laminação controlada final. Após a têmpera, os aços são revenidos.

A figura 2-2 exibe, de modo esquemático, variações da rota, ou processo de fabricação, TMCP, em relação aos processos convencionais

Entretanto, nos processos convencionais de laminação ocorrem somente o reaquecimento seguido de laminação. A seleção dos métodos acima depende da composição química, espessura da chapa e propriedades requeridas.

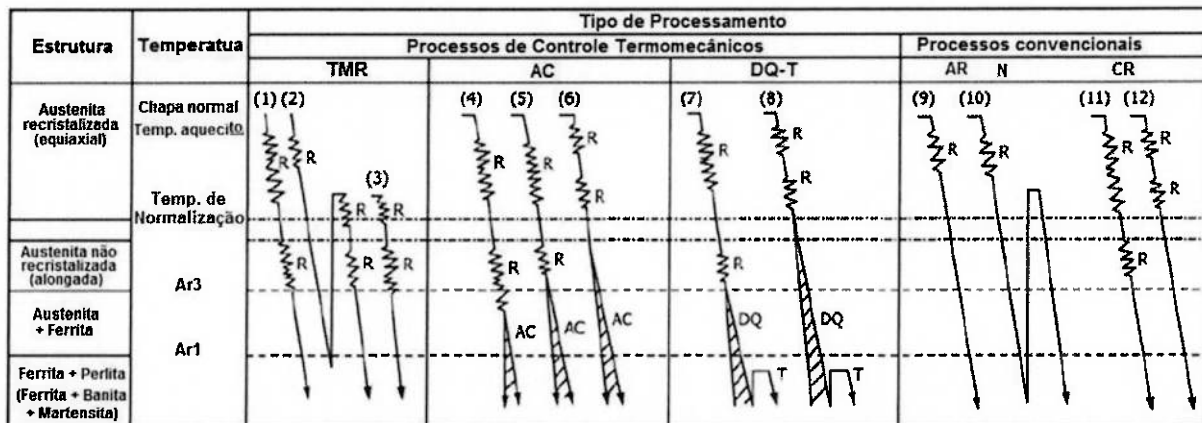


Figura 3-2 Rotas de processamento dos aços ARBL [6]

3.2.7.2. Têmpera e Revenimento

A austenitização alcançada através do aquecimento de um material, mantida por um determinado tempo a uma temperatura constante seguida de resfriamento a uma velocidade adequada, com a finalidade de obter microestrutura martensítica, é denominada tratamento de têmpera [8].

A melhoria na dureza em toda distribuição de uma chapa ou corpo de prova, após a têmpera, depende da temperabilidade do material em questão, sendo esta definida pela variação da dureza entre o centro do material e sua superfície. A formação de martensita está intimamente ligada a temperabilidade dos aços, a velocidade (meio), de resfriamento, as dimensões dos grãos austeníticos e a distribuição da microestrutura antes do tratamento térmico [8].

A ASM Metals Handbook, no volume que disserta sobre Tratamentos Térmicos, sugere como medida econômica, um tempo de patamar em função da dimensão da secção transversal após atingir a temperatura de austenitização, de uma polegada de secção transversal por hora [9].

Alguns métodos são utilizados para a quantificação da temperabilidade dos materiais, como o método de Jominy e o método do diâmetro crítico de Grossmann.

A martensita formada após a têmpera endurece o material, mas traz consigo as tensões residuais e a redução da tenacidade e ductilidade do material e/ou junta soldada. Sendo assim, é necessário realizar o tratamento térmico de revenimento, o qual submete o material a uma temperatura abaixo da temperatura crítica e o resfriando lentamente, com a finalidade de aliviar as tensões. [8]

3.3. Soldabilidade

Segundo a AWS, a soldabilidade de um material está ligada a capacidade de um material a ser soldado, sob condições de fabricação impostas em um projeto específico e realizar satisfatoriamente o serviço pretendido [10].

A princípio, a soldabilidade de um aço carbono é mensurada de acordo com a ocorrência ou não de trinca induzida por hidrogênio. Entretanto algumas formas de desoxidação com a adição de alguns elementos de liga também podem afetar a soldabilidade de um material [11]. O carbono equivalente é um conceito muito utilizado, o qual transforma de forma ponderada a composição química de todos os elementos de liga de um aço em um número [12]. A equação 2-1 é um exemplo para calcular o carbono equivalente. Então pode-se dizer que a soldabilidade de um aço diminui com o aumento do teor de carbono na matriz [2].

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Si + \%Ni + \%Cu}{15} \quad (2-1)$$

Segundo a ASM, carbono equivalente acima de 0,38%, recomenda-se pré-aquecimento no material. Isto pode reduzir as chances de ocorrer a trinca induzida por hidrogênio e, conseqüentemente, melhorar a soldabilidade do material.

3.3.1. Trinca induzida por hidrogênio

As trincas induzidas por hidrogênio são defeitos planares resultantes da contaminação do cordão de solda com o hidrogênio. A utilização de consumíveis de baixo hidrogênio e utilização de recursos como pré-aquecimento e pós aquecimento são recomendadas para evitar a inclusão de hidrogênio no cordão de solda. [2]

3.4. Processo de soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG é definido pelo estabelecimento de um arco elétrico entre metal de adição, denominado arame, e o metal de base a ser unido, em que é necessária a utilização de gás ativo ou inerte, que tem como função principal a

proteção da poça de fusão. O eletrodo consumível é alimentado continuamente, conforme a realização da soldagem [13].

Desta forma, o processo de soldagem MIG/MAG pode ser caracterizado como semiautomático, pois o arame é adicionado à poça de fusão de forma automática durante o processo de soldagem manual. Entretanto, pode ser automatizado através do auxílio de braços robóticos bem como através de deslocadores lineares [13].

3.4.1. Equipamento de soldagem.

O processo de soldagem MIG/MAG utiliza como fonte de energia um retificador ou um gerador, os quais são caracterizados pelos potenciais constantes [13]. A utilização de retificadores em fábricas é mais frequente devido a disponibilidade de tensões em 230V ou 460V. Já os geradores são mais indicados para a soldagem em campo, onde o acesso à energia elétrica é dificultado. A figura 2.3 apresenta, de forma esquemática, um panorama do equipamento de soldagem MIG/MAG semiautomático [14].

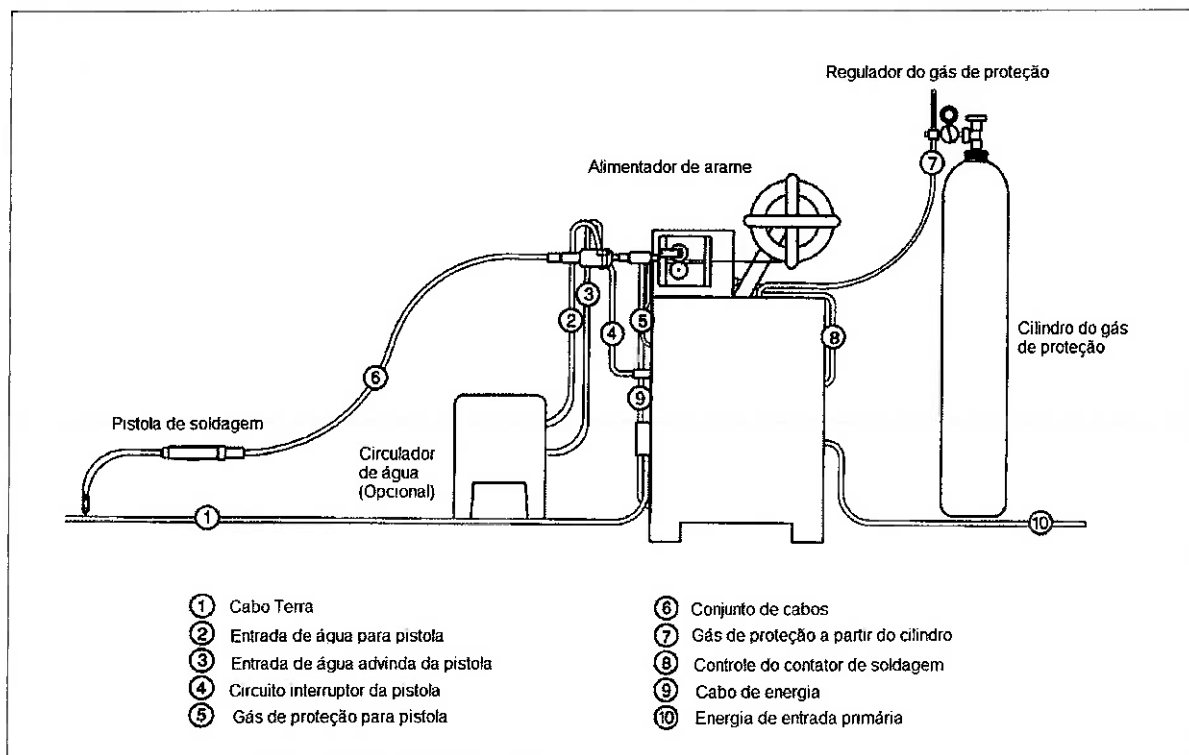


Figura 3-3 Esquema do equipamento de soldagem MIG/MAG [15]

De acordo com a representação esquemática da figura 2-2, o equipamento de soldagem MIG/MAG é composto pela pistola de soldagem, alimentador e controlador de arame, controlador de tensão, cilindro de gás de proteção, fonte de soldagem com característica de tensão constante, um circulador de água (opcional) para realizar o resfriamento da pistola de soldagem, cabos de energia, cabo terra, mangueiras para o transporte de água do resfriador até a pistola e da pistola até o resfriador, e para o transporte de gás desde o cilindro até a pistola MIG/MAG [15].

A figura 2.4 representa o comportamento da tensão do arco elétrico em relação à corrente de uma fonte com características de potencial constante [14].

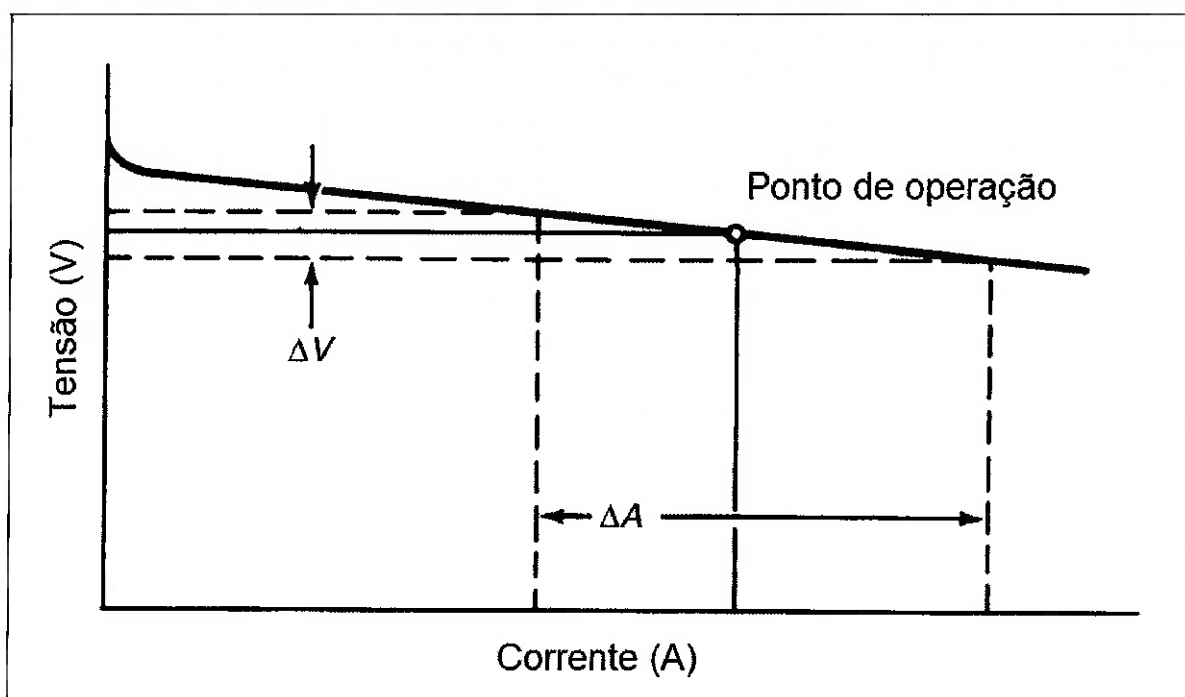


Figura 3-4 Curva de tensão x corrente de uma fonte de tensão constante [15]

Observa-se no gráfico da figura 2-4 que uma pequena variação da tensão, ocasionada pela variação do arco elétrico, é compensada por uma variação da corrente. A corrente é regulada através do arame consumível conforme a variação de sua velocidade de alimentação. Isto ocorre devido ao sistema de tensão controlado pelo sistema de alimentação de arame. Desta forma, o arco elétrico fica estável independente do seu comprimento, e ainda evita-se a queima do bico de contato da pistola MIG/MAG [14].

A figura 2-5 representa o esquema de duas pistolas MIG/MAG durante a soldagem, em que se percebe fisicamente apenas a variação da distância entre o bico de contato e o metal de base. Entretanto, eletricamente houve alteração da corrente em ambas configurações.

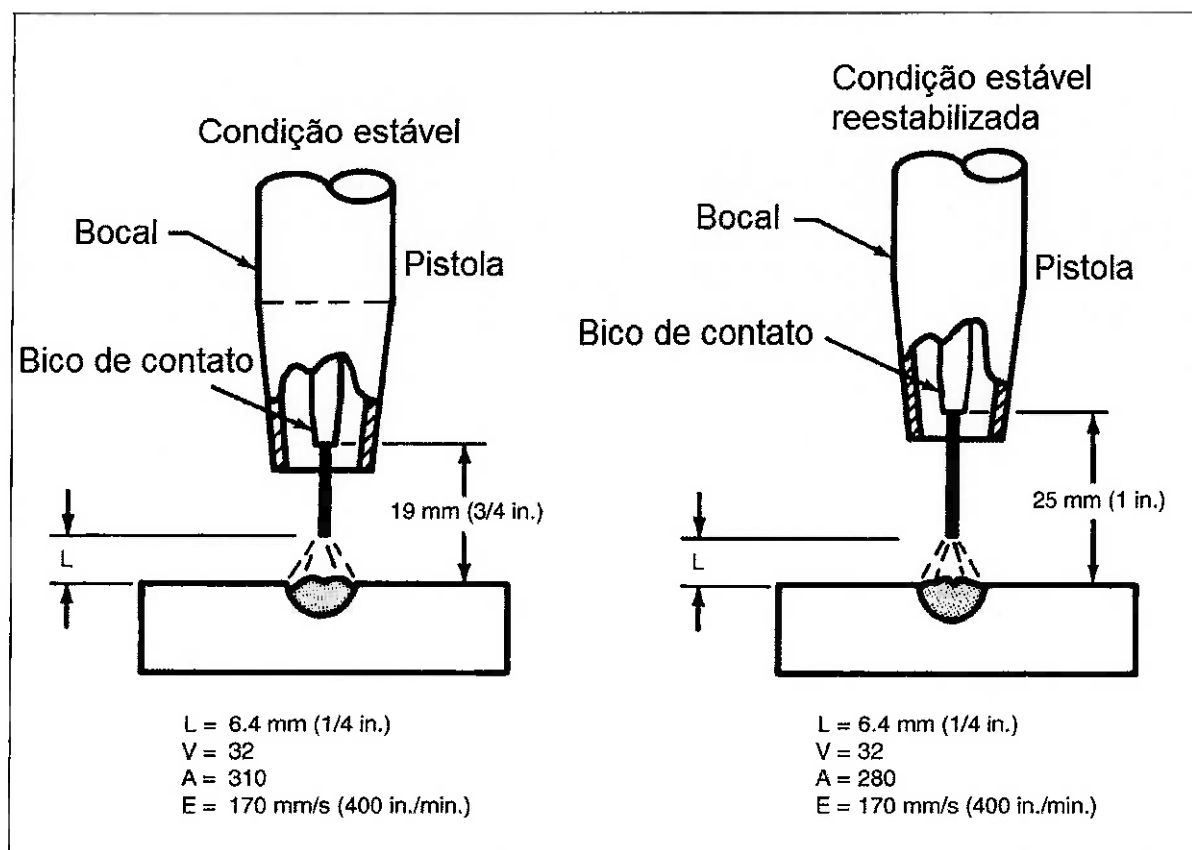


Figura 3-5 Variações dos parâmetros de soldagem em relação ao stick-out [15]

Conforme apresentado na figura 2-5, a segunda pistola varia a distância entre o bico de contato em 6 mm em relação a primeira, cerca de 31,5%. Para manter a tensão constante, bem como outros parâmetros, o sistema do equipamento reduziu a corrente para 280A, ou seja, cerca de 9% [14]. Pode-se observar que a energia de soldagem é mantida e a qualidade de ambos cordões de solda está aceitável.

Dentre as vantagens deste processo estão: a fácil utilização pelo soldador; facilidade de automatização; uso contínuo do consumível de soldagem, que é acondicionado em bobina; possibilidade de aumento da velocidade de soldagem, com consequente aumento da produtividade. Por outro lado, podem-se citar algumas desvantagens, como a necessidade de proteção da poça de fusão através de gases

e a dificuldade de acesso do equipamento de soldagem a lugares complexos, em função de suas dimensões, quando comparado ao equipamento que realiza o processo de soldagem por eletrodo revestido [13].

Os processos de soldagem MIG/MAG são amplamente utilizados na fabricação de tubulações, principalmente em soldagens circunferenciais, devido a sua alta produtividade, fácil mobilidade e baixo índice de descontinuidades nos cordões de solda.

Os equipamentos semiautomáticos ainda necessitam de um soldador para sua operação. O termo semiautomático refere-se à alimentação automática de arame consumível durante a soldagem.

O processo MIG (Metal Inert Gas) utiliza, geralmente, como gás de proteção o Argônio (Ar) ou o Hélio (He). Já o MAG (Metal Active Gas) utiliza, como gás de proteção, gases ativos como CO₂ (Dióxido de Carbono) ou misturas de CO₂ e outros elementos, como o Argônio.

Outra variante nos processos de soldagem MIG/MAG é o modo de transferência metálica. Em especial, o modo de transferência por curto circuito foi aprimorado com a finalidade de reduzir a quantidade de respingos gerados por estes processos.

Desta forma, foram desenvolvidos diferentes formatos de ondas que permitem a formação da gota de metal líquido e o seu depósito na poça de fusão, sem que haja a sua explosão. Esta explosão divide as gotas em volumes menores, que são os inconvenientes respingos. Isto ocorre em função da reduzida seção da gota, na região em que ela é estrangulada, próxima ao arame ainda sólido. Nesta seção, a resistência elétrica da gota torna-se bastante reduzida, o que permite um aumento excessivo da corrente elétrica e, conseqüentemente, um aumento de energia que a atravessa. É justamente esta energia excessiva que promove sua explosão.

3.5. Processo de soldagem Arame Tubular

O processo de soldagem por Arame Tubular (AT) é um processo semiautomático que precisa de um soldador para realizar a operação, enquanto a alimentação do arame é fornecida constantemente, mediante a solicitação através do

acionamento gatilho da pistola de soldagem [15]. A figura 2-6 apresenta o esquema do equipamento de soldagem por AT.

O processo de soldagem por Arame Tubular consiste basicamente em no mesmo equipamento de soldagem do processo MIG/MAG, ou seja, é composto pela fonte de energia, controlador do alimentador de arame, controlador de tensão, cilindro de gás de proteção, pistola de soldagem, cabos elétricos e mangueiras para o transporte de gás de proteção do cilindro até o equipamento e do equipamento até a pistola [15].

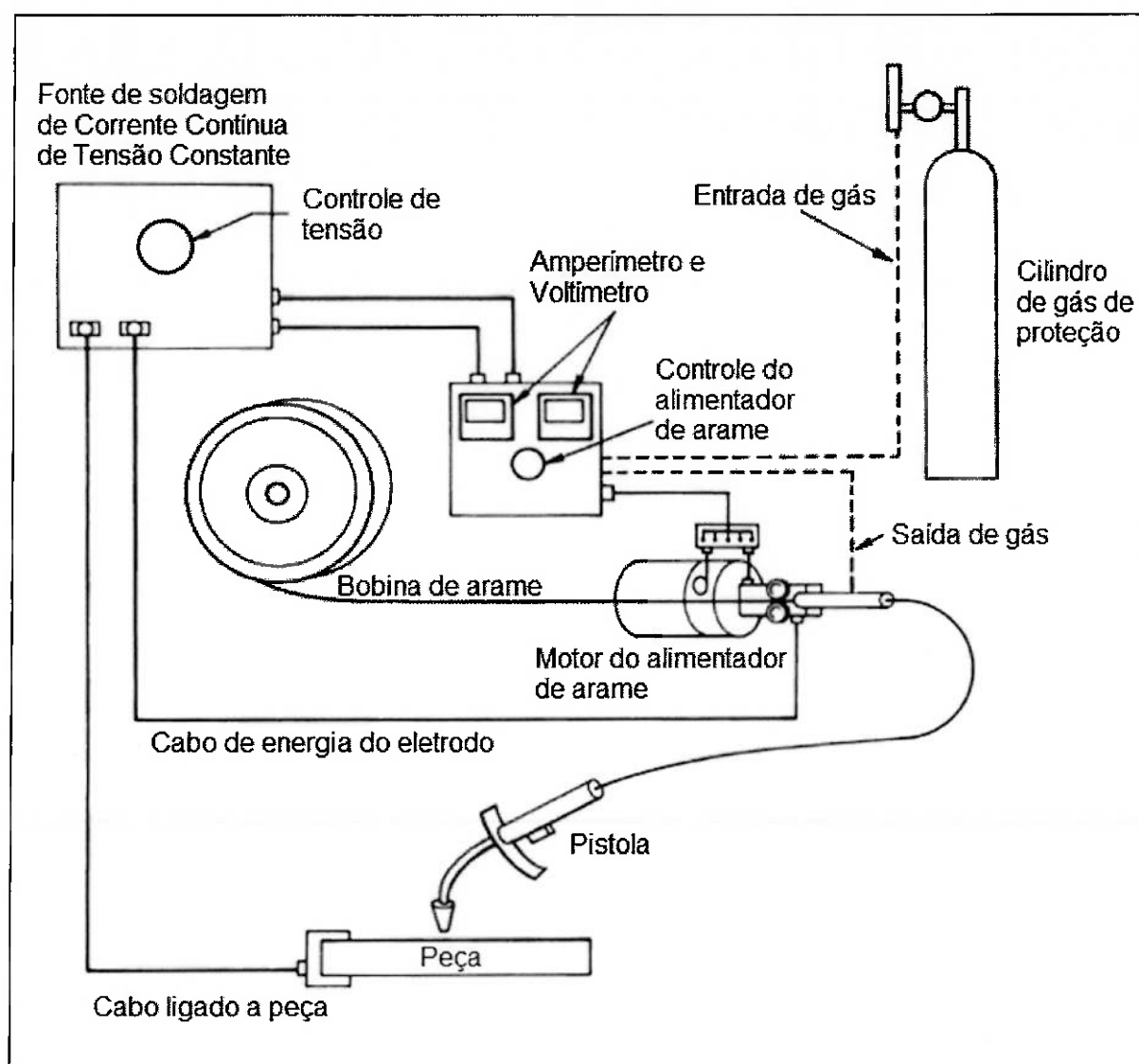


Figura 3-6 Esquema do equipamento de soldagem AT [15]

As roldanas utilizadas para tracionar o arame tubular da bobina até o bocal da pistola são diferentes daquelas utilizadas no processo MIG/MAG. Basicamente, neste

processo, elas são lisas e realizam uma certa pressão no arame para tracioná-lo. Já no processo AT, as roldanas são recartilhadas, permitindo uma aderência eficiente no consumível. Isto faz com que não seja necessária a aplicação de uma pressão no arame tal como utilizada no processo MIG/MAG. Desta forma, a deformação de arames tubulares, que são mais maleáveis que os arames sólidos, é minimizada [16].

O nome arame tubular é definido em função da forma tubular de seu consumível. Em seu interior são adicionados elementos de liga que alteram as composições químicas das juntas soldadas, além de aumentar a taxa de deposição durante a soldagem e realizar a proteção da poça de fusão com ou sem auxílio de gás de proteção. A figura 2-7 ilustra de forma sucinta, um corte transversal, como está disposto o material no interior do tubo e o procedimento de fechamento de um arame tubular.

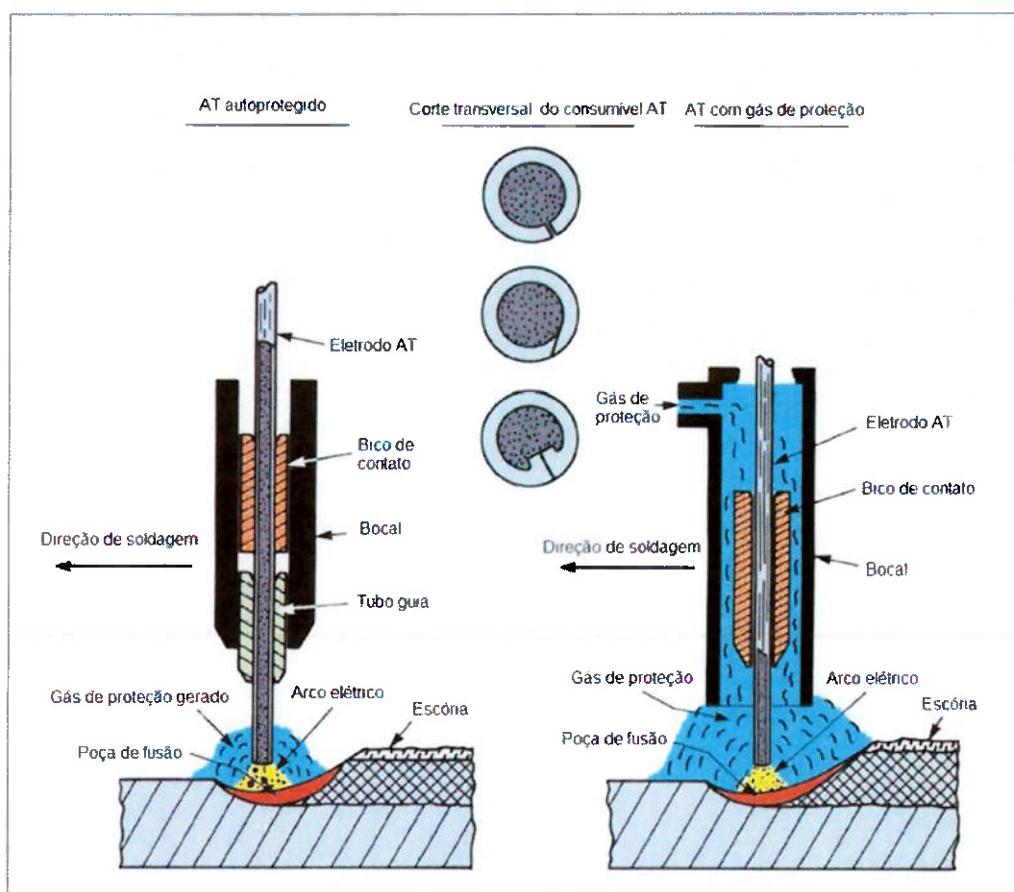


Figura 3-7 Esquema do AT Autoprotégido, Corte transversal do consumível AT e AT com gás de proteção [15].

O processo AT dispõe de três tipos de consumíveis que diferem entre si nas composições químicas, no interior do tubo. São classificados como: arame tubular com material metálico (Metal Cored), arame tubular com proteção gasosa (FCAW-G) e arame tubular autoprotégido (FCAW-S).

- Arame tubular com material metálico (Metal Cored): criado com o intuito de gerar alta produtividade através de uma alta taxa de deposição. Isto se deve pelo fato da adição de materiais metálicos, como pó de ferro.

- Arame tubular com proteção gasosa (Flux Cored): o material adicionado em seu interior é não metálico. Sua composição auxilia na soldagem fora de posição e permite uma velocidade de soldagem maior que outros consumíveis para arame tubular.

- Arame tubular autoprotégido: difere dos arames sólidos utilizados no processo MIG/MAG, pois sua seção tubular leva em seu interior elementos de liga e escorificantes. Este consumível, quando fundido, forma escória cuja densidade é inferior à do metal líquido da poça de fusão. Desta forma, a escória líquida sobrenada no metal líquido, protegendo a poça de fusão da influência do ar atmosférico [15].

Os consumíveis do processo AT são classificados de acordo com a AWS/ANSI A5.20 para a soldagem de aços carbono, AWS/ANSI A5.29 para soldagem de aços baixa liga, AWS/ANSI A5.22 para soldagem de aços inoxidáveis, AWS/ANSI A5.21 para revestimentos [15].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados neste trabalho foram apresentados nos subtópicos a seguir.

4.1. Material de base

Foi realizada a soldagem de dois anéis tubulares de 300,0 mm de comprimento cada, retirados de um tubo de 1016 mm (40") de diâmetro e 16,5 mm de espessura. O chanfro do tubo era do tipo V com ângulo de bisel de 30°.

Os tubos foram fabricados seguindo a norma API 5L, e classificado como API 5L X80, sendo o aço obtido pela rota de fabricação TMCP. A composição química do aço está apresentada na tabela 4-1.

Tabela 4-1 Composição do Aço API 5L X80 utilizado neste estudo.

Elemento	Média	Elemento	Média
C	0,0610	Ti	0,0150
Mn	1,5970	V	0,0270
Si	0,2160	Nb	0,0649
P	0,0050	B	0,0003
S	0,0030	Ca	0,0024
Cr	0,1920	Pb	0,0001
Ni	0,1980	Sb	0,0029
Mo	0,0020	Sn	0,0013
Al	0,0490	Zn	0,0023
Cu	0,0120	CE _{Pcm}	0,1655

4.2. Soldagem dos tubos

A soldagem dos dois anéis foi realizada junto às instalações da empresa Lincoln Eletric do Brasil. Primeiramente os tubos foram alinhados deixando uma abertura de raiz de 1,6mm entre eles. Após a montagem, foi realizado o passe de raiz utilizando o processo de soldagem MAG com transferência controlada e gás de proteção, a mistura gasosa de 80% Ar e 20% CO₂ com vazão de 17 l/min. O arame utilizado neste passe foi o ER80S-G com 1,1mm de diâmetro. Durante a soldagem foram coletados dados de tempo de soldagem, tensão média do arco elétrico, corrente média de soldagem e velocidade de alimentação do arame.

Nos passes de enchimento e de acabamento, o processo utilizado foi o Arame Tubular com proteção gasosa. O gás de proteção utilizado foi uma mistura de 75% argônio e 25% CO₂, com vazão de 16 l/min. O consumível utilizado foi o arame E101T1-GM H8 de 1,1 mm de diâmetro. Na figura 4-1 observa-se o esquema com todos os cordões de solda.

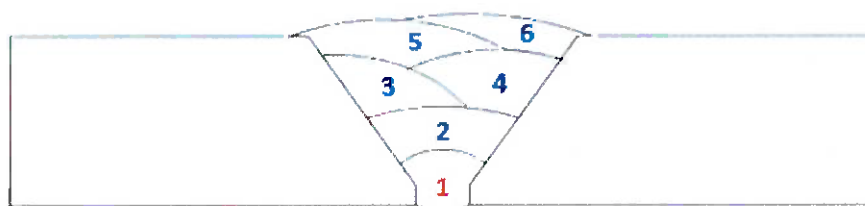


Figura 4-1 Esquema da junta soldada indicando as camadas e os passes de solda

A figura 4-1 apresenta os passes realizados na junta do tubo API 5L X80, indicando com o número 1, o passe de raiz, realizado pelo processo MAG com transferência controlada e, os demais passes, a partir de 2 até o número 6, indicam os passes de enchimento e acabamento realizados pelo processo de soldagem Arame Tubular.

Durante a soldagem foram coletados parâmetros como tensão, corrente, tempo de arco aberto, extensão do cordão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame consumível e energia de soldagem. Foi utilizado um recurso do equipamento de soldagem, responsável pela aquisição do chamado True Energy™, em kJ (kilojoules), o qual é uma forma de aproximação da Energia de Soldagem, bastando dividi-lo pelo comprimento do cordão de solda realizado, neste caso, kJ/mm.

4.3. Tratamentos térmicos

Foram realizados tratamentos térmicos de têmpera austenitizando os dois corpos de prova a 1000°C e dois corpos de prova a 900°C em juntas soldadas e resfriadas em água com temperatura de 25°C até alcançarem a temperatura ambiente. Após o tratamento térmico de têmpera, foram realizados tratamentos térmicos de revenimento a 500°C e 650°C para cada corpo de prova temperado a 1000°C e a 900°C.

O tempo de encharque realizado no tratamento térmico de têmpera foi de 50 minutos e o tempo de encharque aplicado ao tratamento térmico de revenimento foi de 55 minutos. A tabela 4-2 apresenta a disposição das temperaturas utilizadas no tratamento térmico de têmpera e revenimento.

Tabela 4-2 Temperaturas aplicadas para os tratamentos térmicos

Têmpera (°C)	Revenimento (°C)
900	650
900	500
1000	500
1000	650

4.4. Macrografia

Para a realização das macrografias das juntas soldadas, as amostras foram cortadas em serra fita, embutidas em baquelite com diâmetro de 50mm, lixadas e polidas. Após estes procedimentos, as macrografias foram obtidas através da reação química entre o Nital 2% e a amostra. Em cada condição de tratamento térmico foi feito quantificação da ZAC através de um software instalado em um computador junto a Lupa da marca ZEISS modelo Stemi 2000C.

4.5. Micrografia

A preparação das amostras para a realização das micrografias foram as mesmas para a realização das macrografias. Tanto o metal de base quanto as juntas

soldadas, foram atacados com o reagente Nital a concentração de 6%. As micrografias do metal de base foram realizadas nas vistas frontal, superior e lateral, formando um cubo, com ampliações de 200X, 500X e 1000X.

4.6. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma ASTM A370 utilizando corpo de prova de tração cilíndrico, conforme a figura 4.2 abaixo.

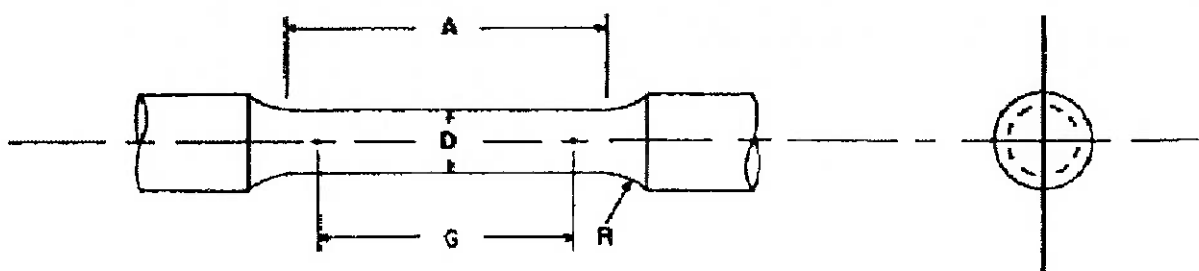


Figura 4-2 Corpo de prova para ensaio de tração [17]

Os corpos de prova foram retirados do tubo, paralelo ao sentido de laminação. As dimensões dos cilindros para o ensaio são: A é o comprimento da secção reduzida e foi utilizado 60mm, o R é o raio de 10mm, o D é o diâmetro e foram utilizados 12,5mm com margem de erro de 0,25mm para mais ou menos e G, o comprimento padrão, foi utilizado 50mm, com margem de erro de 0,1 para mais ou menos.

4.7. Ensaio de Impacto Charpy com entalhe em V.

Os corpos de prova de impacto Charpy com entalhe em V foram realizados de acordo com a norma ASTM A370. Cada conjunto contém três corpos de prova. Observa-se na tabela 4-3, de forma resumida, o esquema de identificação dos corpos de prova e as temperaturas utilizadas nos ensaios. Os critérios de aceitação utilizados foram definidos pela API 1104.

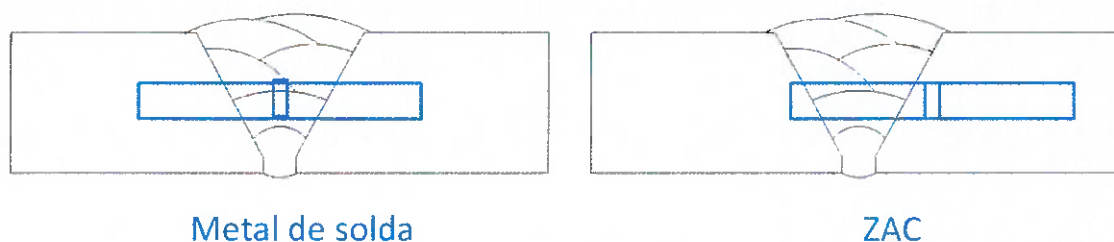


Figura 4-3 Disposição dos corpos de prova de ensaio de impacto Charpy, ao centro do metal de solda e na Zona Afetada pelo Calor (ZAC).

A figura 4-3 define a identificação de cada conjunto de corpos de prova para a realização do ensaio Charpy entalhe em “V”. Em cada condição foram realizados três ensaios de impacto nas temperaturas de -40°C e 0°C.

Tabela 4-3 Temperaturas de realização do ensaio e identificação dos corpos de prova

Temperatura de Tratamento Térmico (Têmpera/Revenimento) (°C)	Charpy		ZAC	
	-40 °C	0 °C	-40 °C	0 °C
Metal de base	3	3	0	0
Sem Tratamento Térmico	3	3	3	3
900/650	3	3	3	3
900/500	3	3	3	3
1000/500	3	3	3	3
1000/650	3	3	3	3

4.8. Microdureza

Foi realizado o ensaio de microdureza Vickers HV 0.5, em equipamento modelo DuraScan 70 da marca Emco-Test. O teste consiste na realização da dureza em toda a área da junta soldada bem como uma parte do metal de base. Foram realizados e analisados cerca de 5000 indentações com distância entre elas de 0,3mm, em cada condição de tratamento térmico. Todas as endentações formam um mapa de microdureza, realizado pelo software, do fabricante do equipamento de microdureza, chamado eCOS Workflow, versão V.2.11.0. A figura 4-4 apresenta de forma esquemática a forma que os resultados do ensaio de dureza foram retirados da amostra.

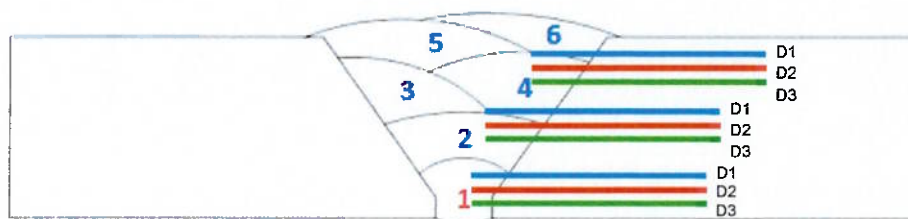


Figura 4-4 Esquema da retirada dos resultados de microdureza das juntas soldadas.

Conforme a figura 4-4, D1, D2 e D3 são perfis de dureza de uma região específica. O passe de raiz apresenta três perfis de microdureza, a partir do metal de solda, passando pela ZAC até o metal de solda. Cada perfil é composto por, no mínimo, vinte e quatro endentações, isto é, vinte e quatro resultados de microdureza. Para as regiões de enchimento e acabamento, foi realizado o mesmo procedimento do passe de raiz.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes aos ensaios mecânicos e metalográficos estão apresentados neste capítulo bem como as respectivas discussões.

5.1. Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem foram adquiridos através de um sistema de aquisição de tensão, corrente e alimentação de arame, compondo a energia de soldagem convencional. Foi utilizado o software do equipamento de soldagem para a aquisição do True Energy™. Os resultados foram apresentados na tabela 5-1.

Tabela 5-1 Parâmetros de soldagem do tubo API 5L X80

Energia de soldagem (J/mm)	Raiz	1ª camada 1º passe	2ª camada 1º passe	2ª camada 2º passe	3ª camada 1º passe	3ª camada 2º passe
True Energy™	315,9	352,4	272,1	378,9	862,5	852,2
Convencional	307,1	350,8	270,9	377,6	858,8	849,9

5.2. Caracterização metalográfica

A caracterização metalográfica consiste na apresentação da junta soldada como um todo, a macrografia, e a apresentação das micrografias, as quais mostram regiões específicas, com aumentos microscópicos.

5.2.1. Macrografia das juntas soldadas

As macrografias realizadas nas juntas soldadas e tratadas termicamente foram apresentadas neste subtópico. Pode-se tirar informações referentes a área da zona afetada pelo calor e as respectivas diluições de cada amostra.

A tabela 5-2 apresenta a diluição das juntas soldadas. O lado esquerdo (LE) e lado direito (LD) representam as áreas entre o chanfro original e a zona de ligação. As juntas tratadas são Sem Tratamento Térmico (Sem TT), 1000/500, 1000/650, 900/500 e 900/650. A junta Sem TT foi apresentada em condições como soldada, isto é, não sofreu tratamento térmico pós soldagem.

Tabela 5-2 Diluição das juntas soldadas do tubo API 5L X80

Diluição				
TT	LE (mm ²)	LD (mm ²)	Cordão (mm ²)	Diluição (%)
Sem TT	35,50	14,69	182,89	22%
1000/500	19,4	18,95	212,90	15%
1000/650	22,3	13,95	167,21	18%
900/500	26,44	18,17	165,29	21%
900/650	31,77	23,83	146,51	28%

Observa-se que os resultados, referentes a diluição, são próximos entre si. Entretanto as variações não são significativas visto que a soldagem foi feita manualmente. A figuras 5-1 apresenta a macrografia do CP Sem TT com as respectivas áreas do metal de solda e do metal de base junto ao metal de solda, representando uma diluição de 22%.

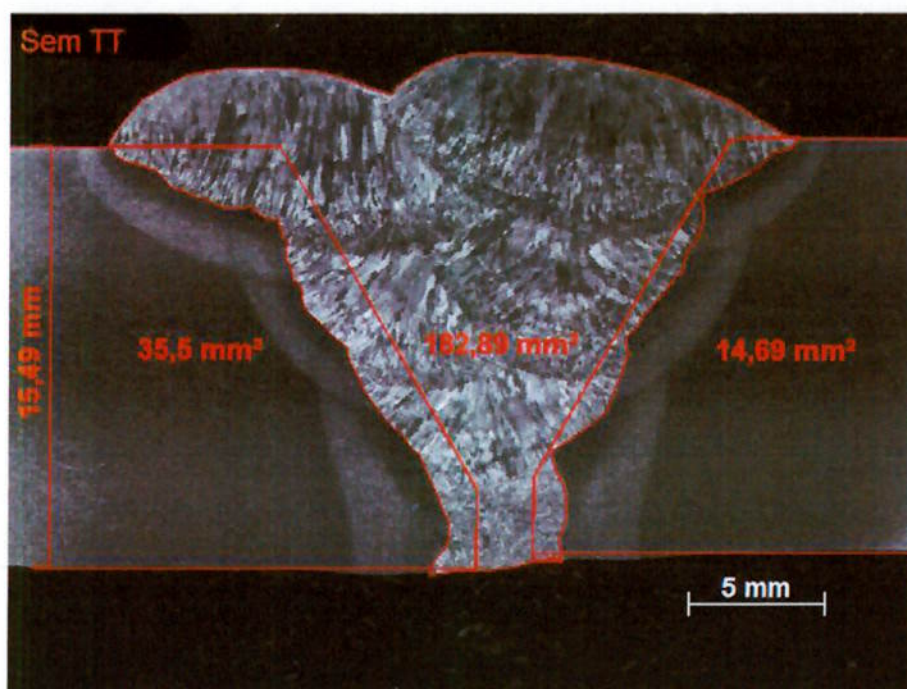


Figura 5-1 Diluição da junta Sem TT

A figura 5-2 apresenta a macrografia, indicando as áreas das regiões da junta soldada TT 1000/500. Esta junta apresenta uma diluição de 15%.

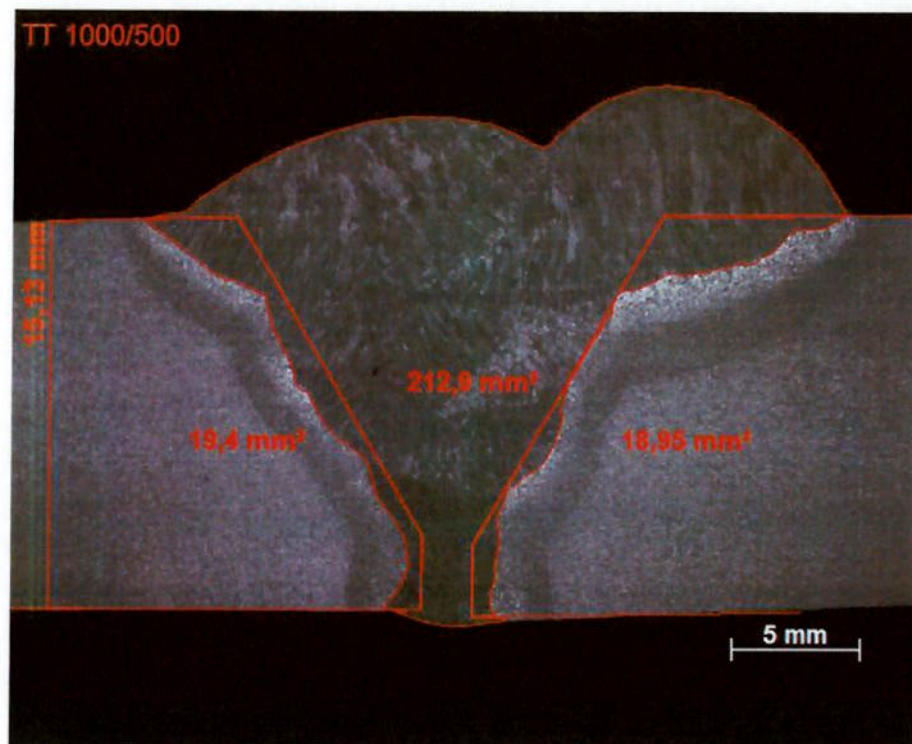


Figura 5-2 Diluição da junta TT 1000/500

A figura 5-3 apresenta macrografia da junta TT 1000/650, com suas respectivas áreas. A diluição desta junta, de acordo com os dados encontrados nela, é 18%.

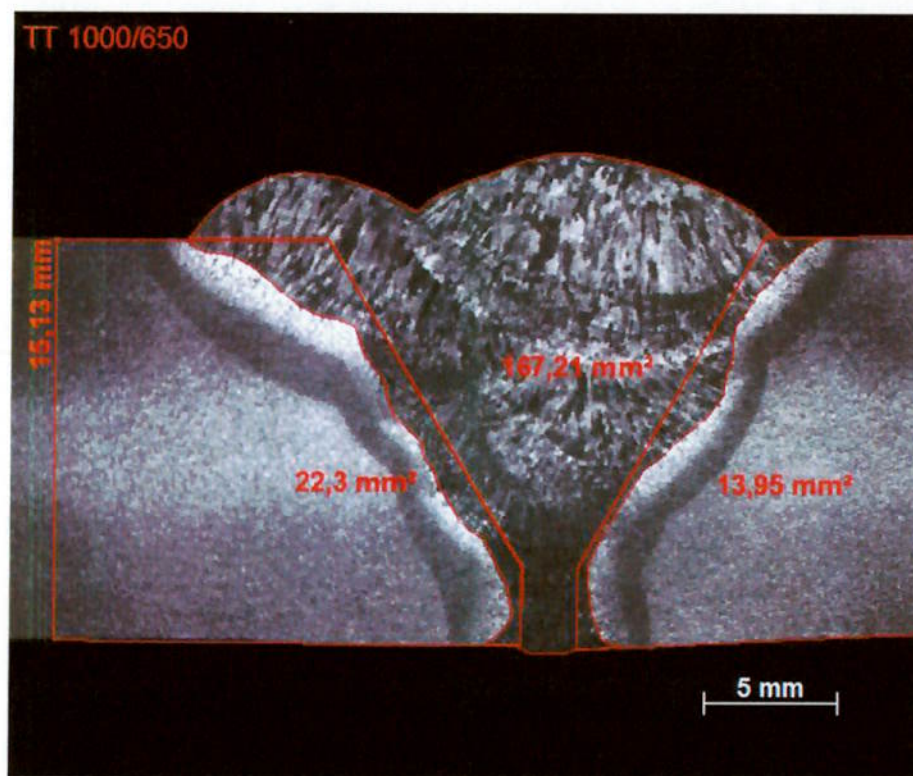


Figura 5-3 Diluição da junta TT 1000/650

A figura 5-4 apresenta o CP da junta soldada TT 900/500. A diluição encontrada nesta amostra foi de 21%.

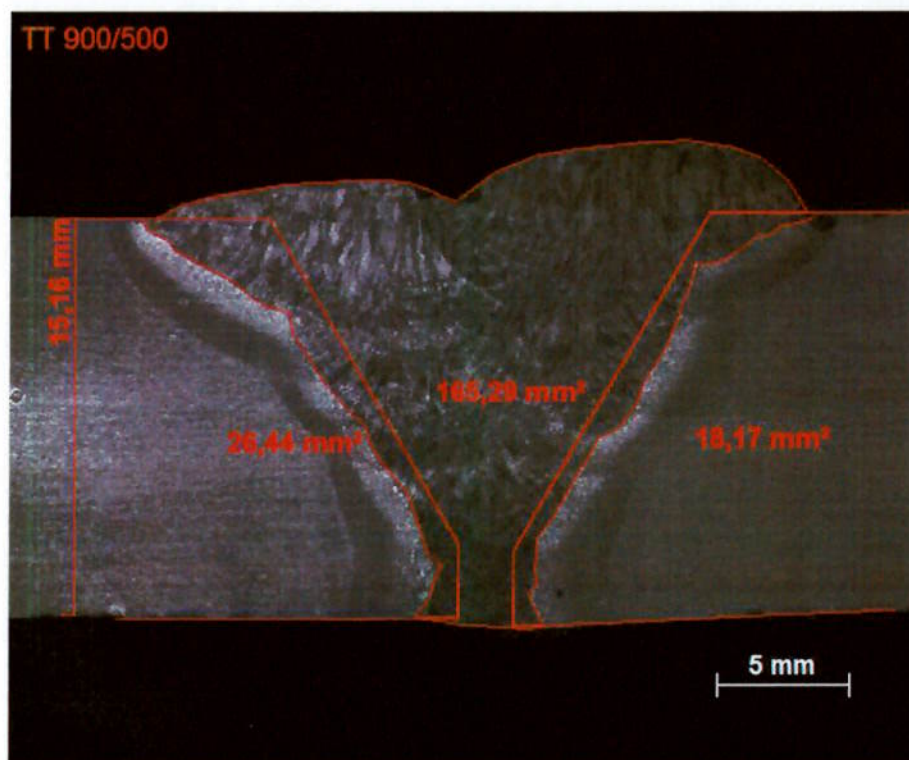


Figura 5-4 Diluição da junta TT 900/500

Entretanto, a junta que obteve maior diluição, apresentada na figura 5-5, foi a TT 900/650, com 28%.

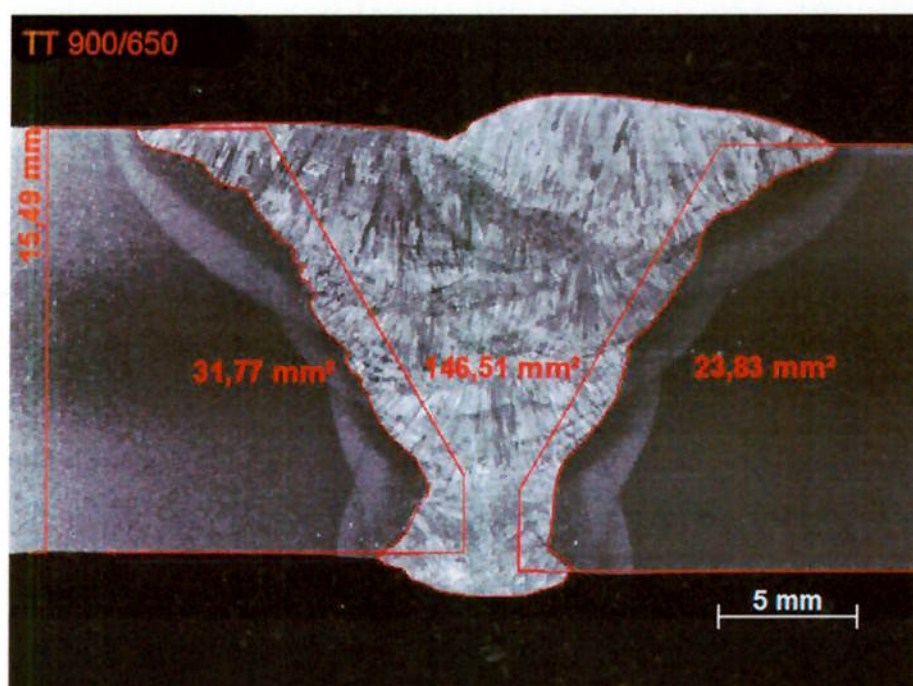


Figura 5-5 Diluição da junta TT 900/650

As figuras apresentadas, através de análise macroestrutural, reforçam a ideia que os tratamentos térmicos realizados, não alteraram a diluição do metal de solda no metal de base, em relação a condição sem tratamento térmico. Pode-se observar que os cordões não possuem uniformidade, a qual pode ser explicada devido ao processo de soldagem semiautomático.

A área da ZAC foi realizada conforme o mesmo procedimento realizado para coletar os dados da diluição. A tabela 5-3 apresenta os resultados da diluição para cada condição de tratamento térmico.

Tabela 5-3 Resultados das áreas das ZAC segundo as macrografias.

Área da ZAC			
TT	LE (mm ²)	LD (mm ²)	Média (mm ²)
Sem TT	46,16	40,35	43,26 ± 4,11
1000/500	35,62	61,84	48,73 ± 18,54
1000/650	46,16	40,35	43,26 ± 4,11
900/500	41,34	40,43	40,89 ± 0,64
900/650	37,79	39,67	38,73 ± 1,33

As áreas da ZAC apresentam valores médios próximos entre si. O corpo de prova apresenta a menor média, cerca de 10% menor em relação a condição sem tratamento térmico. Em referência à maior média da ZAC, apresentada pelo TT 1000/500, o corpo de prova TT 900/650 apresenta-se, aproximadamente, 20% menor. A figura 5-6 apresenta a macrografia da junta Sem TT, com a respectiva área da ZAC, contornadas em vermelho. Considerando as áreas da ZAC do lado direito e lado esquerdo da junta, chegou-se a uma média de 43,25 mm².

A figura 5-10 apresenta a área da ZAC, lado direito e lado esquerdo, da junta TT 900/650. A média encontrada da área da ZAC foi de 38,73 mm².

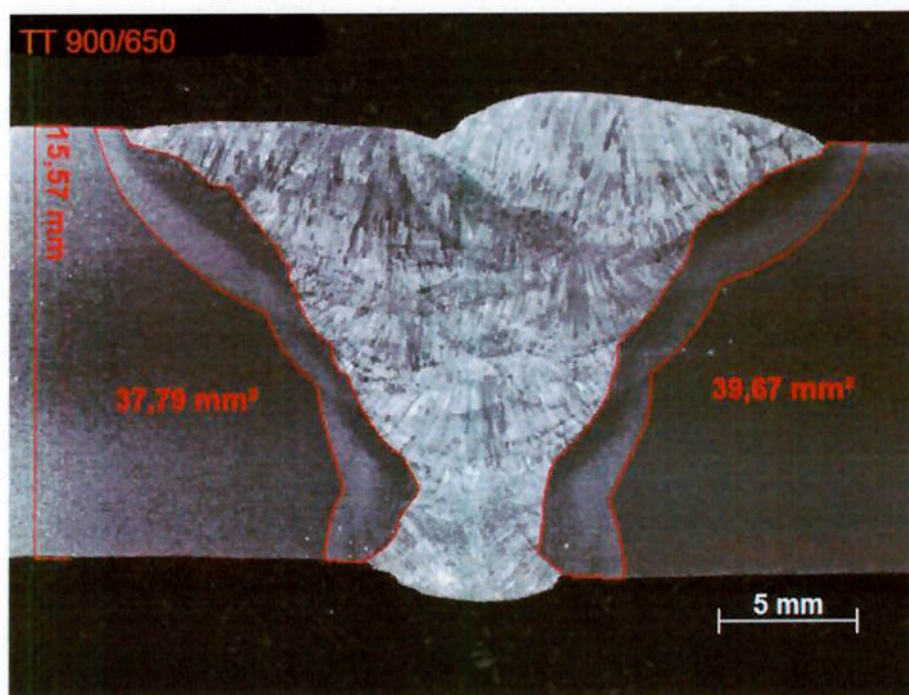


Figura 5-10 Área da ZAC da junta TT 900/650

Observa-se nas macrografias apresentada, que as áreas da ZAC não sofreram alterações. Entretanto, as áreas adquiridas por imagem não são eficientes para diferenciar, com precisão, a ZAC e metal de base, em comparação com um mapeamento de microdureza de uma junta soldada. O subtópico 5.4 Micrografia, apresenta os mapas de microdureza para cada junta tratada termicamente bem como a junta sem tratamento térmico.

5.2.2. Micrografia do metal de base

A microestrutura dos aços de tubo API 5L X80 é a princípio formada por ferrita, perlita e agregados ferrita carbonetos. Dependendo da aplicação do material, as microestruturas são alteradas, a partir de processos de laminação controlada e composição química, para se adequar a devida aplicação. [2]

A figura 5-11 representa a micrografia em forma de cubo, apresentando-a em 3 vistas. A ampliação é de 200x. A seta indica o sentido de laminação do material.

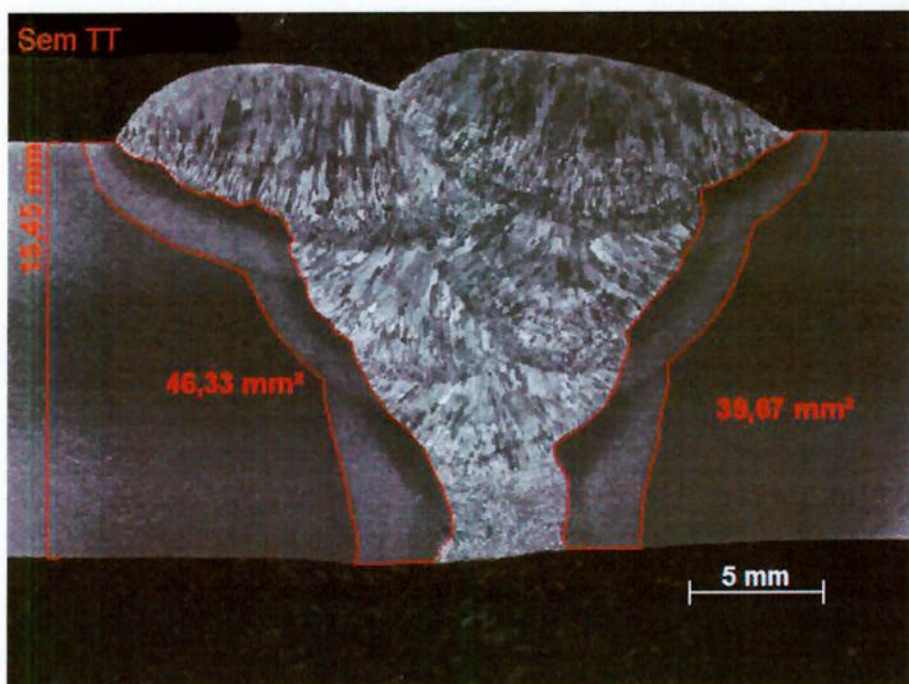


Figura 5-6 Área da ZAC da junta Sem TT

A figura 5-7 apresenta a área da ZAC da junta TT 1000/500. Realizando a média aritmética dos valores do lado direito e lado esquerdo, obtém-se $48,73 \text{ mm}^2$.

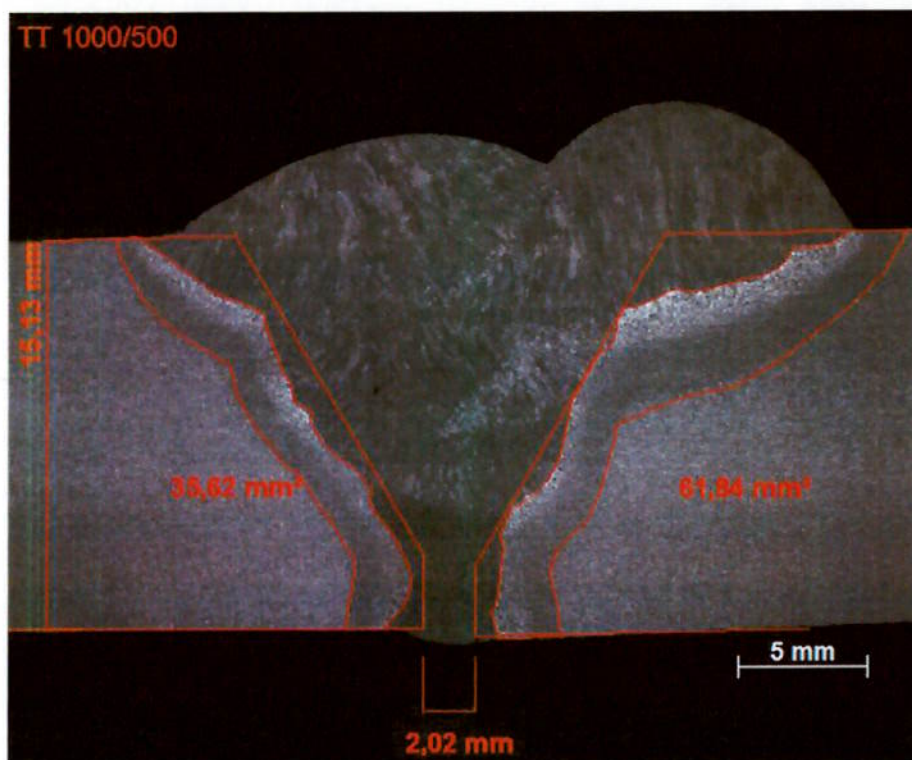


Figura 5-7 Área da ZAC da junta TT 1000/500

A macrografia da figura 5-8 apresenta a área da ZAC da junta TT 1000/650. A média entre a área da ZAC do lado esquerdo e o lado direito foi 43,36 mm².

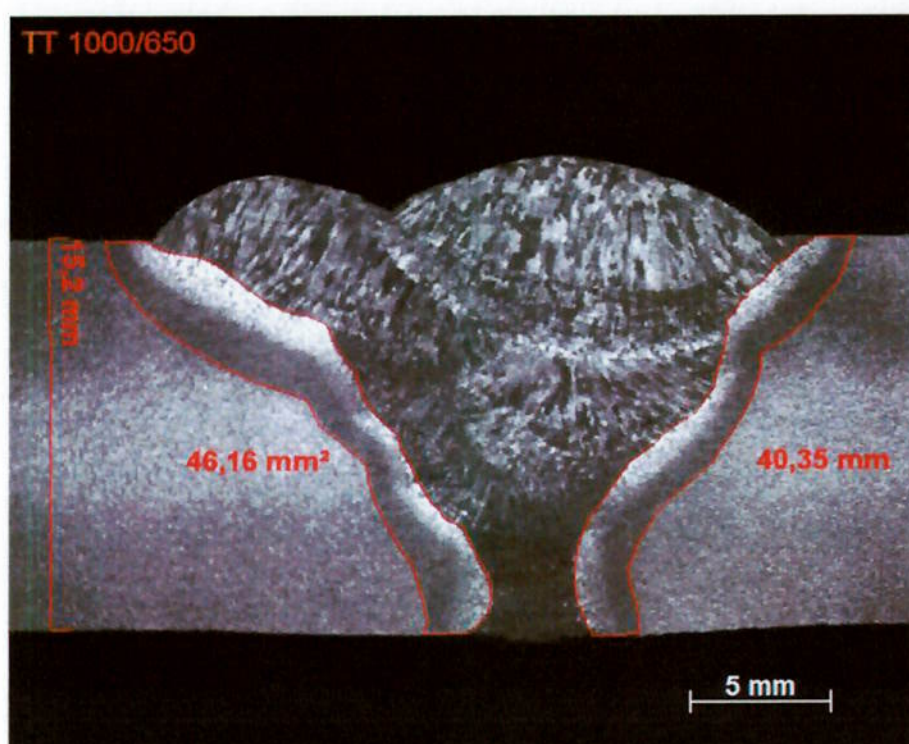


Figura 5-8 Área da ZAC da junta TT 1000/650

A figura 5-9 apresenta a macrografia da junta TT 900/500 com suas respectivas áreas da ZAC. A média encontrada, entre o lado direito e esquerdo, foi de 40,89 mm².

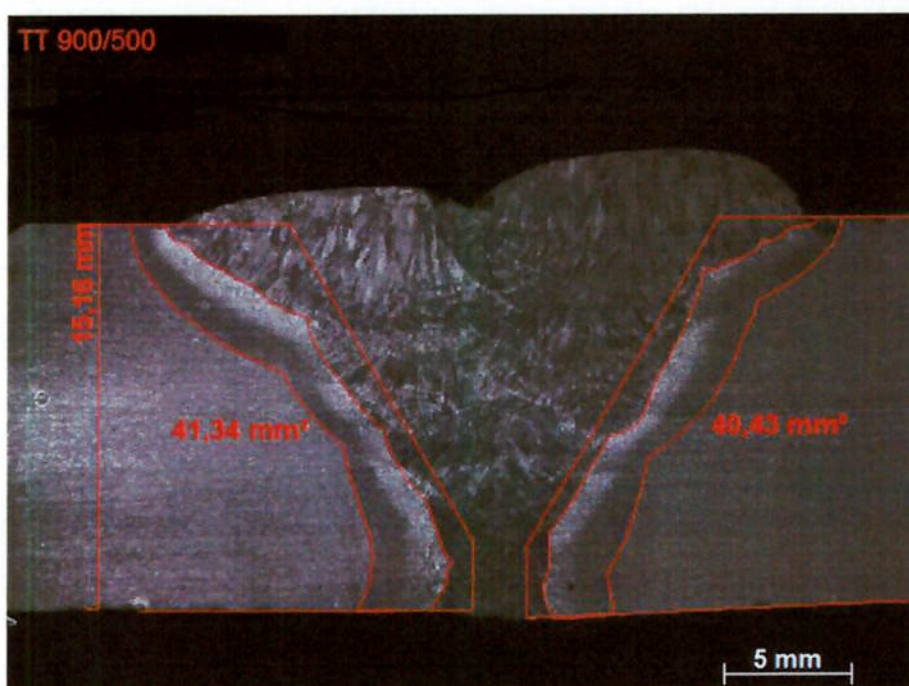


Figura 5-9 Área da ZAC da junta TT 900/500

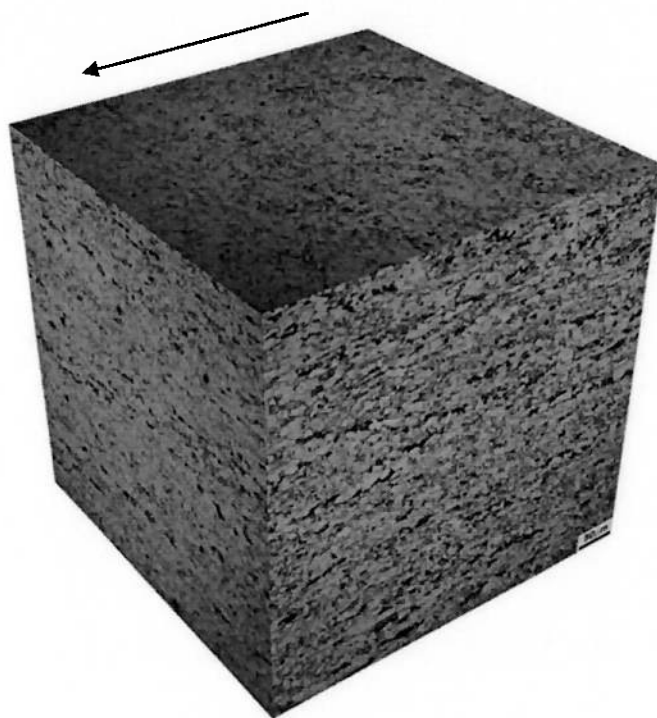


Figura 5-11 Microestrutura em três dimensões do aço API 5L X 80 ampliada em 200x.

A figura 5-12 representa a micrografia em forma de cubo, apresentando-a em 3 vistas. A ampliação é de 500x. A seta indica o sentido de laminação.

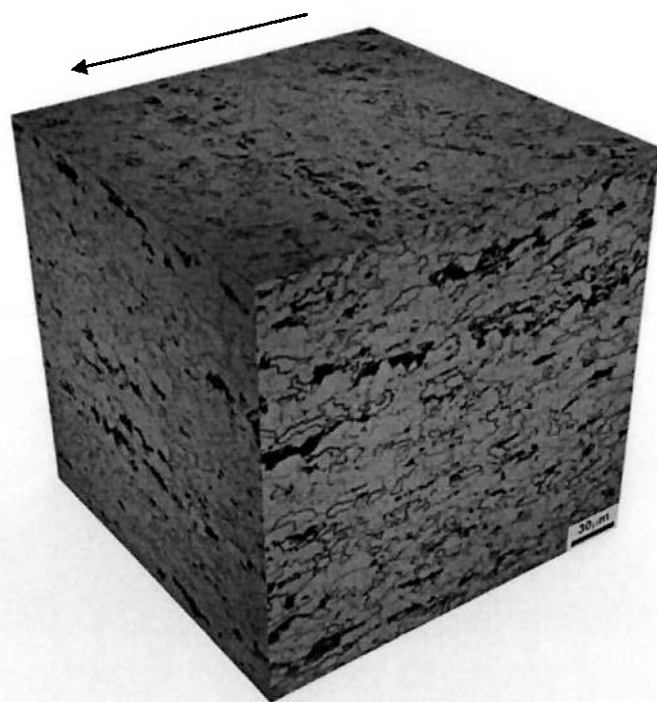


Figura 5-12 Microestrutura em três dimensões do aço API 5L X80 ampliada em 500x

A figura 5-13 apresenta a micrografia do metal de base, em forma de cubo. A ampliação é de 1000x e a seta indica o sentido de laminação do material.

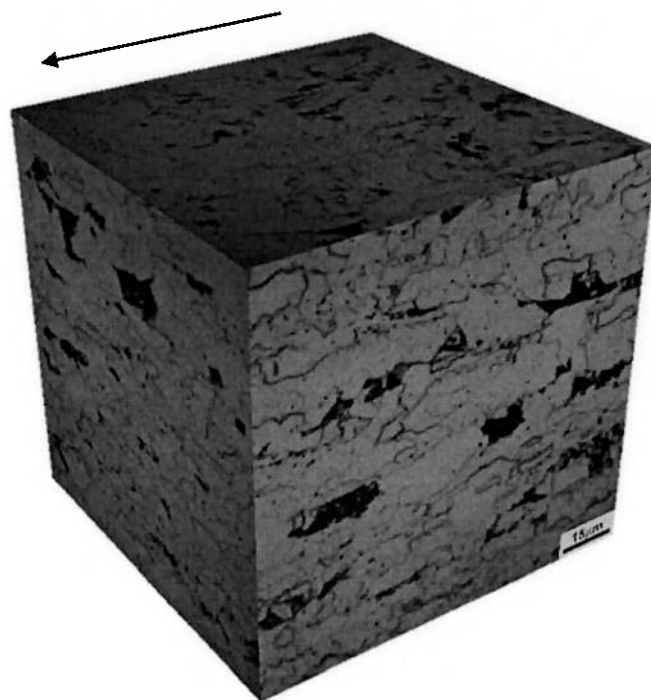


Figura 5-13 Microestrutura em três dimensões do aço API 5L X80 ampliada em 1000x

A figura 5-14 apresenta comparações entre o metal de base sem tratamento térmico com os demais metais de base tratados termicamente através de micrografias. Devido a estrutura refinada do aço API 5L X80, as micrografias estão com aumento de 500x.

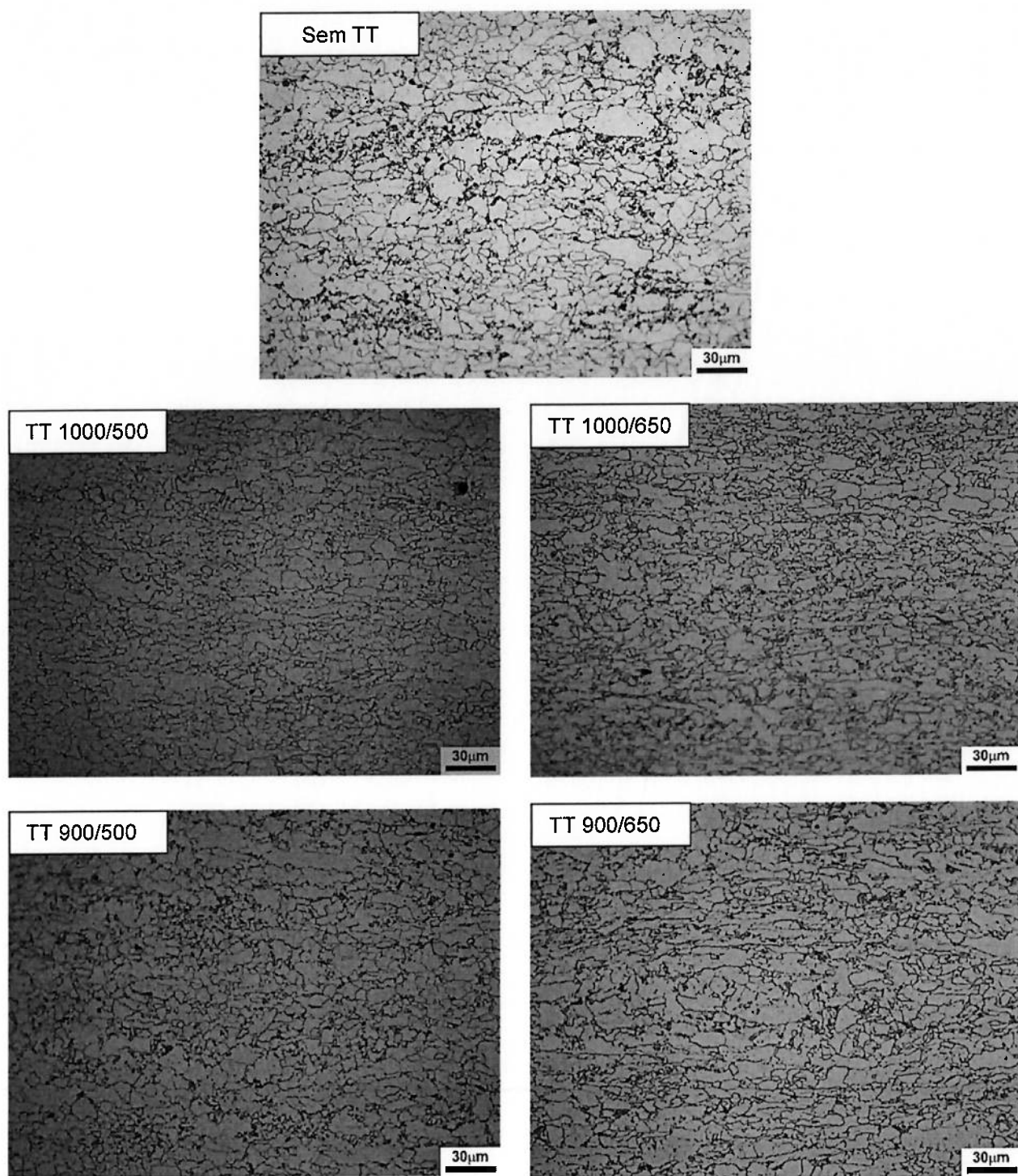


Figura 5-14 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, do metal de base realizadas em cada condição de tratamento térmico.

A figura 5-15 apresenta as micrografias da região do metal de solda, realizadas em todas amostras tratadas termicamente bem como a como soldado. As figuras foram ampliadas 500x em microscópio óptico.

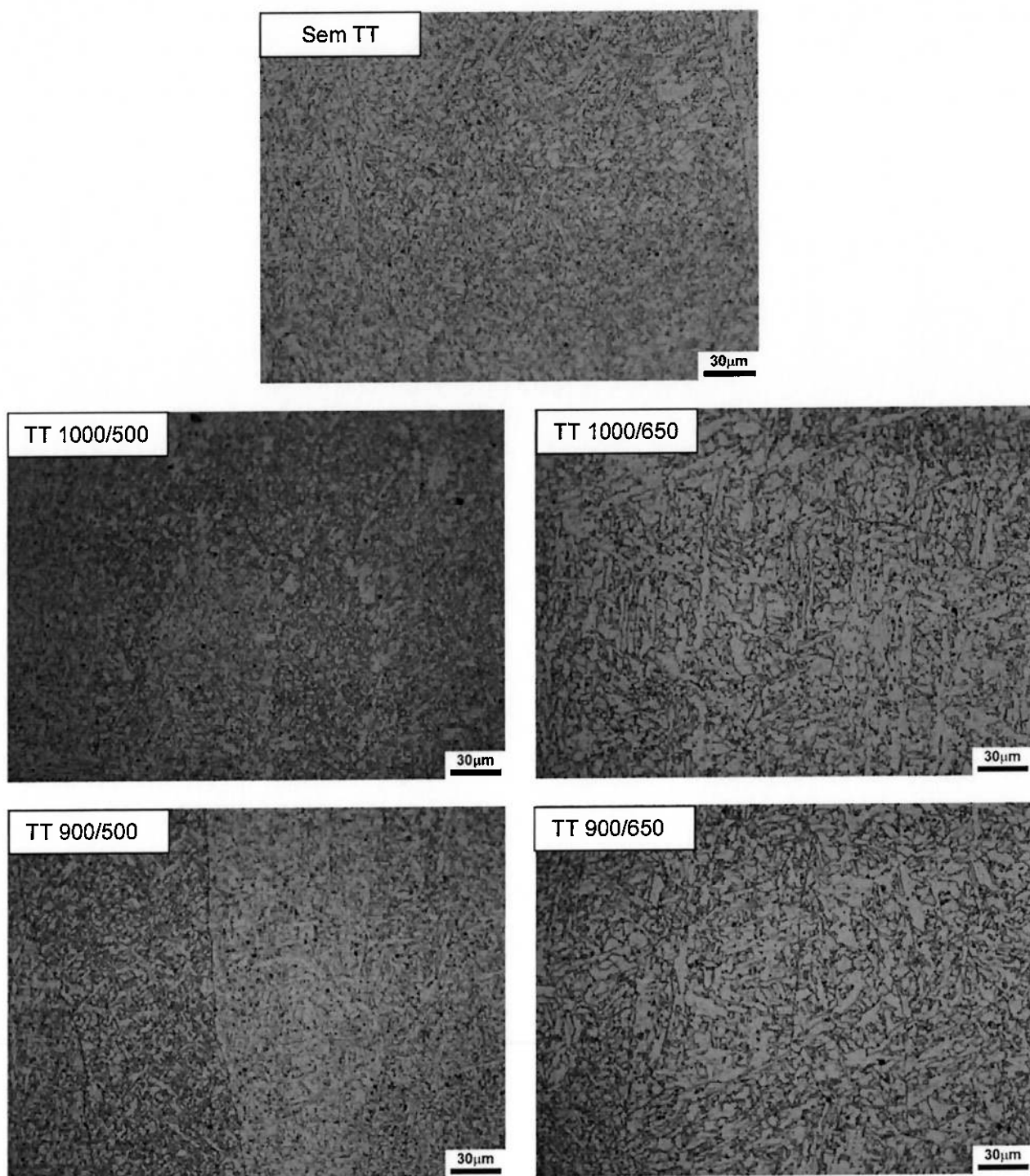


Figura 5-15 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, do metal de solda realizadas em cada condição de tratamento térmico.

A figura 5-16 apresenta a região de grãos grosseiros de todas amostras tratadas termicamente, inclusive o corpo de prova como soldado. A ampliação utilizada foi de 500x.

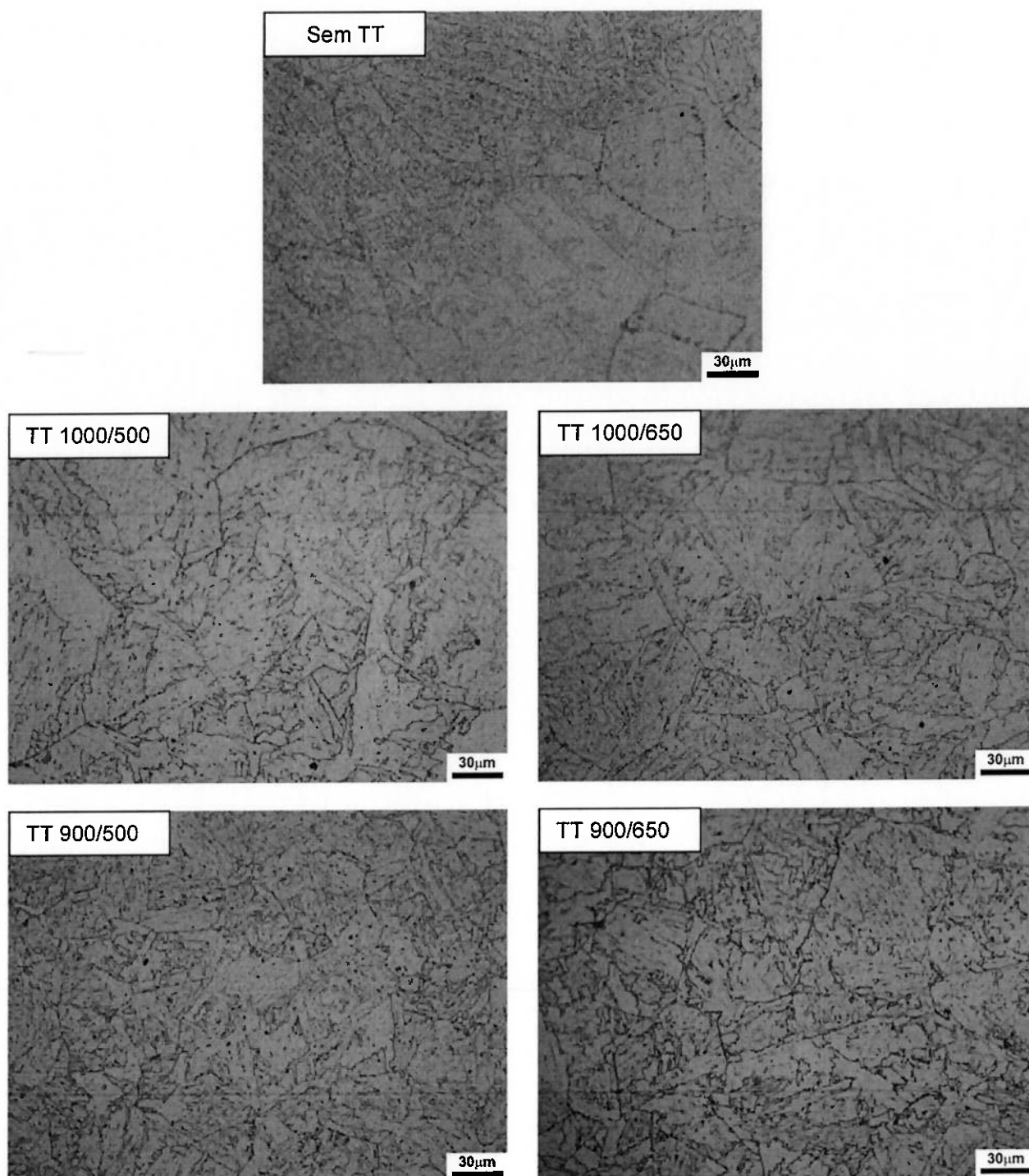


Figura 5-16 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, da região de grãos grosseiros realizadas em cada condição de tratamento térmico.

A figura 5-17 apresenta as micrografias realizadas na zona de grãos refinados. A ampliação utilizada foi de 500x.

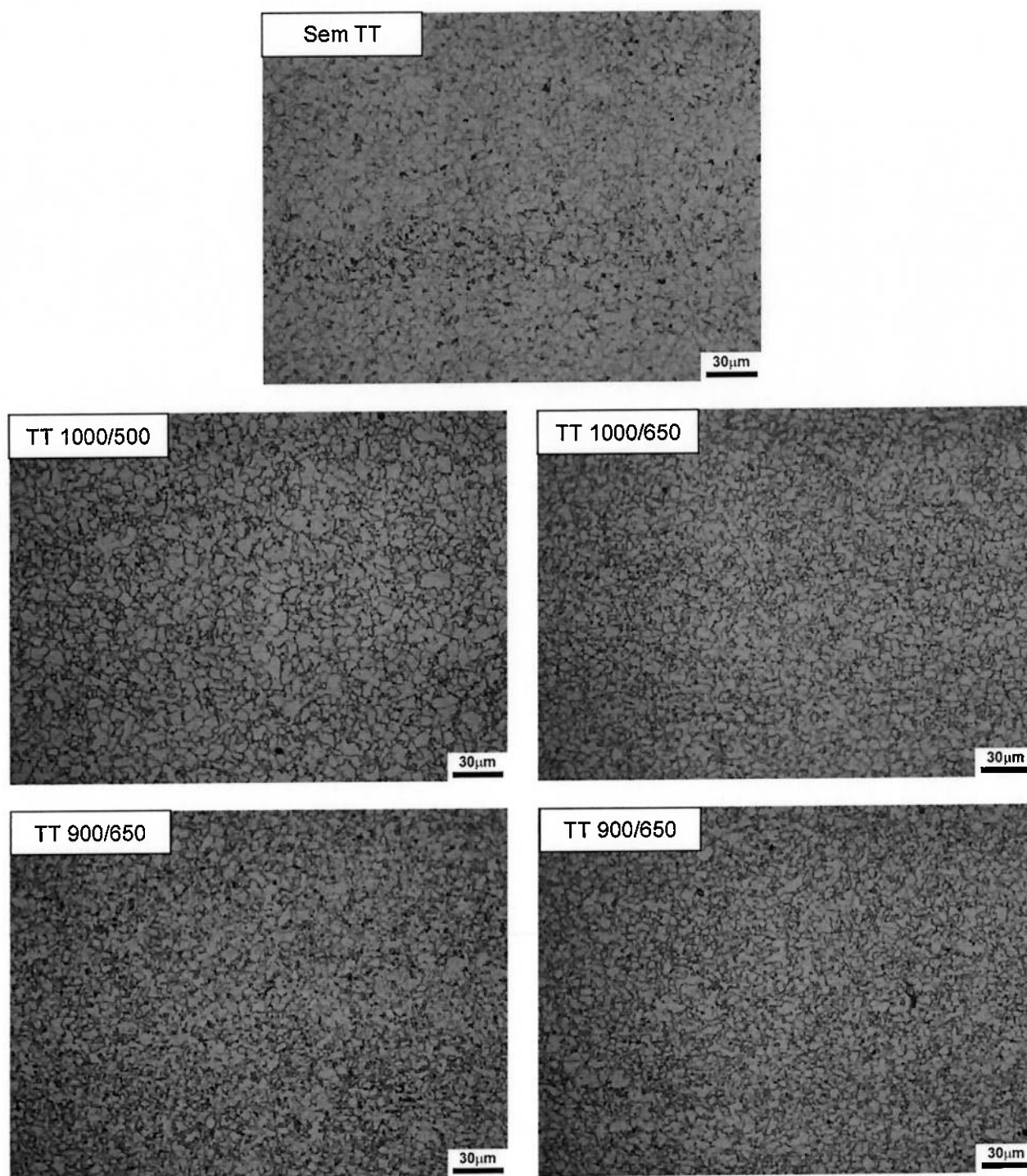


Figura 5-17 Comparação de micrografias, com ampliação de 500x, da região de grãos refinados realizadas em cada condição de tratamento térmico.

5.3. Ensaio de tração

Foram realizados ensaios mecânicos de tração para cada configuração de tratamento térmico realizado nas juntas soldadas, inclusive no metal de base. Os corpos de prova (CP) foram retirados do tubo na junta circunferencial, sentido longitudinal a laminação. A tabela 5-4 apresenta os resultados obtidos deste ensaios, rastreando os números de CP e relacionando com os respectivos tratamentos térmicos (TT) e temperaturas de ensaio em (°C). Está indicado também o valor mínimo requerido pela norma API 5L, tanto limite de escoamento quanto limite de resistência.

Tabela 5-4 Resultados do ensaio mecânico de tração

TT (°C)	LE (MPa)	LE min. API 5L (MPa)	LR (MPa)	LR min. API 5L (MPa)
MB	532,5	555,0	623,5	625,0
Sem TT	Nota 1		532,0	
TT900/650			638,0	
TT900/500			618,0	
TT1000/500			616,0	
TT1000/650			605,0	

Nota 1: As juntas soldadas possuem limite de escoamento (LE), entretanto há imprecisão do local onde houve escoamento. Então, para os ensaios de tração da junta soldada, não é considerado os resultados de limite de escoamento, apenas o limite de resistência.

A figura 5-18 apresenta os resultados do ensaio de tração nas juntas soldadas dos corpos de prova com diferentes tratamentos térmicos. A reta em vermelho indica o limite de resistência mínimo requerido pela norma API 5L.

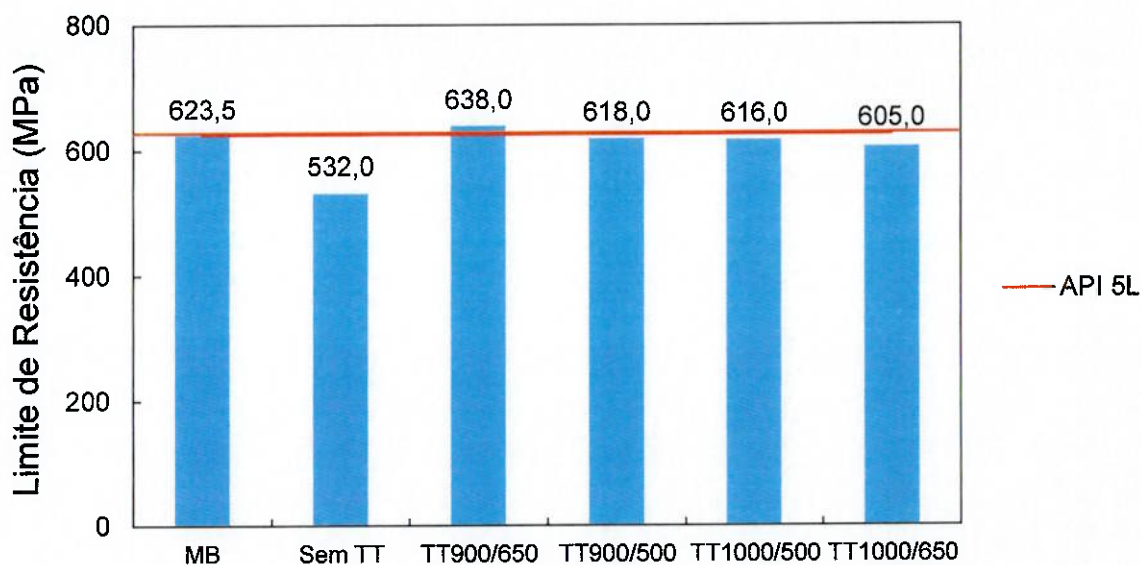


Figura 5-18 Limite de resistência para cada condição de tratamento térmico. A linha na cor vermelha representa o limite de escoamento mínimo exigido pela norma API 5L para classificação do metal de base.

Quanto aos limites de resistência referentes às juntas soldadas em relação aos tratamentos térmicos, observa-se que o TT 900/650 atingiu um valor acima do valor apreciado pela norma API 5L, isto é, este tratamento proporcionou a junta ensaiada um incremento de aproximadamente 2% no limite de resistência. Os demais resultados referentes ao metal de base e tratamentos térmicos não alcançaram o limite mínimo requerido, portanto estão reprovados perante a norma. O resultado encontrado na condição Sem TT foi aproximadamente 15% menor quando comparados com a norma API 5L e 17% menor em relação ao melhor resultado encontrado TT900/650.

5.4. Microdureza Vickers (HV 0,5)

Foram realizados ensaios de microdureza ao longo de toda a extensão em juntas soldadas para cada condição de tratamento térmico, inclusive a condição não tratada. A partir destes resultados, foram criados mapas de Microdureza, capazes de identificar visualmente as regiões que possuem microdurezas maiores ou menores. A figura 5-19 apresenta o mapa de microdureza da junta soldada sem tratamento térmico. A escala nesta figura auxilia na identificação das regiões com maiores e menores microdurezas, através das cores.

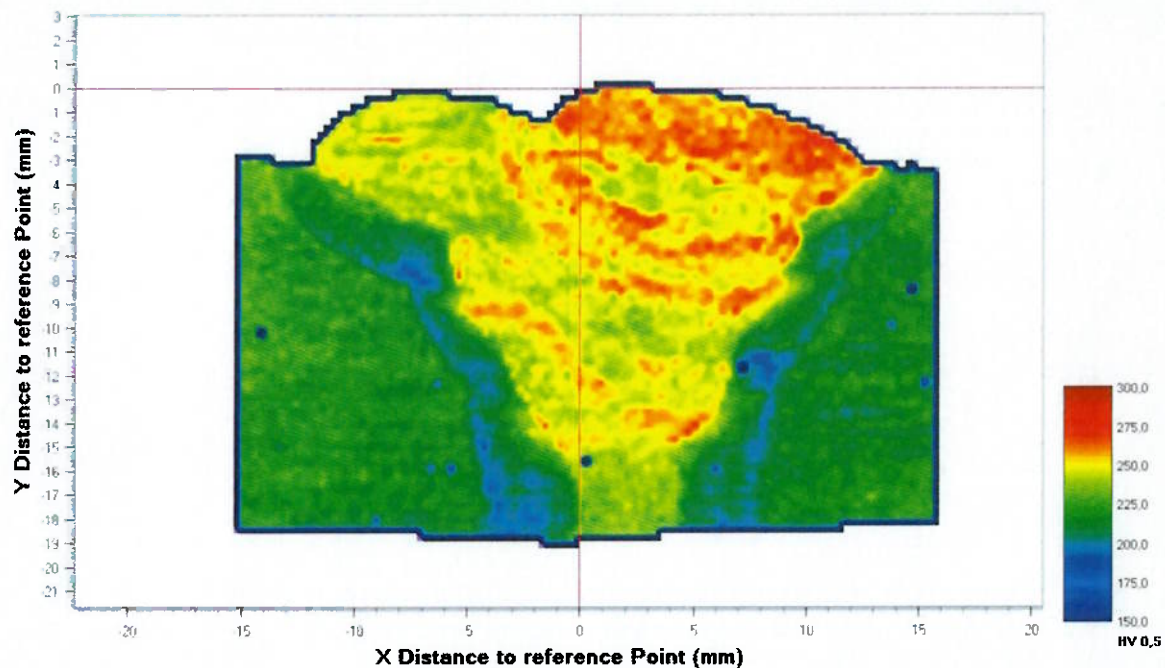


Figura 5-19 Mapa de microdureza da junta soldada em condições Sem TT.

A tabela 5-5 contém uma amostra do perfil de microdureza da região da raiz da junta Sem TT.

Tabela 5-5 Resultado de microdureza realizado na região do passe de raiz da junta Sem TT.

Raiz Sem TT							
X (mm)	D1 HV 0,5	D2 HV 0,5	D3 HV 0,5	X (mm)	D1 HV 0,5	D2 HV 0,5	D3 HV 0,5
0	250	242	241	3,6	211	201	207
0,3	237	235	239	3,9	205	198	207
0,6	245	239	239	4,2	207	198	196
0,9	234	232	233	4,5	206	215	198
1,2	237	241	236	4,8	201	209	206
1,5	237	245	225	5,1	201	209	197
1,8	243	240	239	5,4	197	200	197
2,1	240	236	235	5,7	199	210	203
2,4	205	225	225	6	208	212	211
2,7	207	203	211	6,3	210	218	218
3	214	204	212	6,6	212	214	226
3,3	208	204	209	6,9	228	225	214

A figura 5-20 apresenta o gráfico do perfil de microdureza do passe de raiz da junta Sem TT.

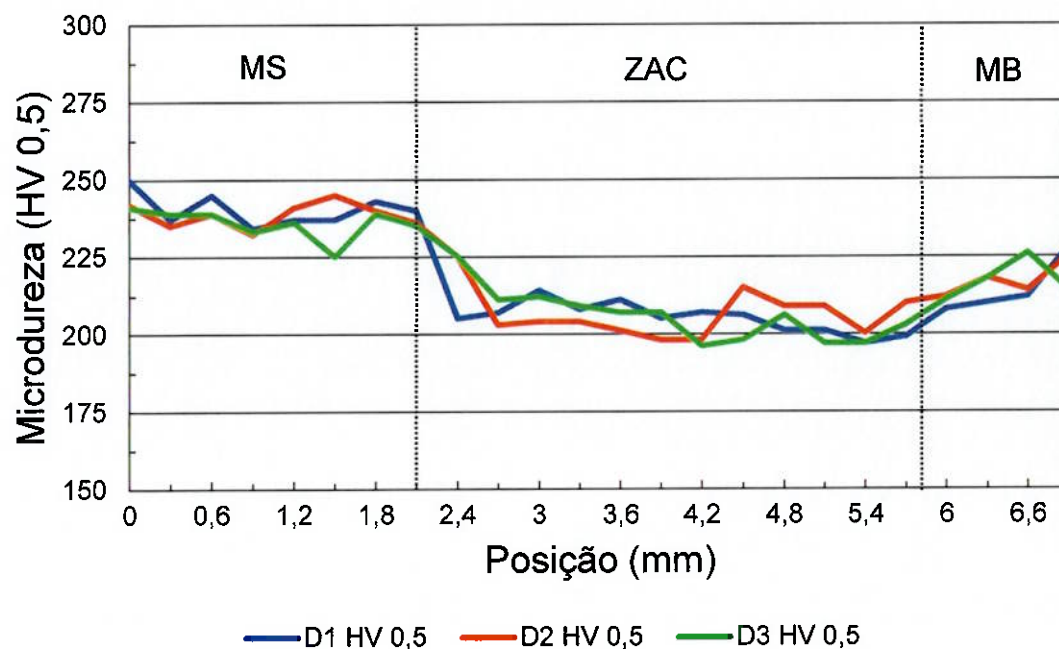


Figura 5-5-20 Perfil de microdureza de raiz do CP Sem TT

A tabela 5-6 apresenta os resultados de microdureza da região do passe de enchimento da junta Sem TT.

Tabela 5-6 Resultado de microdureza realizado na região do passe de enchimento em CP Sem TT.

Enchimento Sem TT							
X (mm)	D1 HV 0,5	D2 HV 0,5	D3 HV 0,5	X (mm)	D1 HV 0,5	D2 HV 0,5	D3 HV 0,5
0	248	243	247	3,6	252	221	204
0,3	237	245	250	3,9	230	219	215
0,6	245	244	252	4,2	228	221	211
0,9	245	250	250	4,5	221	209	209
1,2	247	240	250	4,8	214	218	215
1,5	249	264	243	5,1	210	212	210
1,8	255	249	239	5,4	211	214	208
2,1	248	245	254	5,7	218	204	202
2,4	251	247	233	6	212	203	205
2,7	253	246	242	6,3	200	209	210
3	238	250	236	6,6	206	217	216
3,3	247	238	214	6,9	214	224	220

Através dos dados da tabela 5-6, o gráfico da figura 5-21 foi feito, representando o perfil de microdureza da região do passe de enchimento da junta Sem TT.

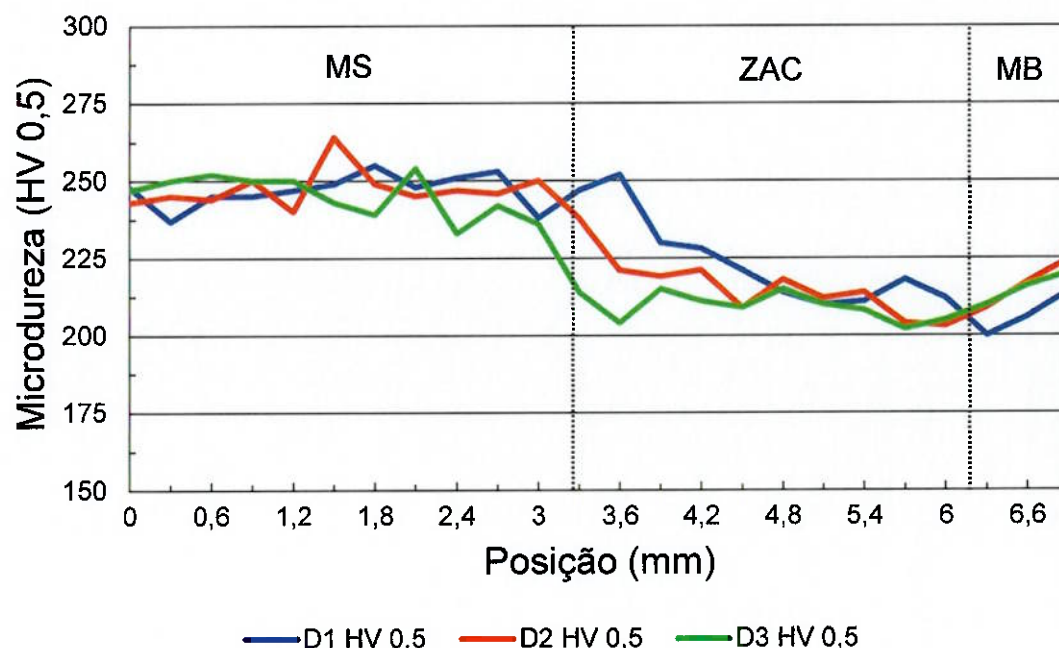


Figura 5-21 Perfil de microdureza do enchimento da junta Sem TT.

A tabela 5-7 reúne uma amostra da microdureza da região do passe de acabamento da junta Sem TT.

Tabela 5-7 Resultado de microdureza realizado na região do passe de acabamento em CP Sem TT.

Acabamento Sem TT							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	268	249	252	3,6	261	260	259
0,3	242	256	249	3,9	257	264	252
0,6	250	259	262	4,2	258	251	244
0,9	252	252	261	4,5	258	242	228
1,2	245	246	264	4,8	243	230	235
1,5	251	254	250	5,1	239	241	218
1,8	250	254	261	5,4	235	225	218
2,1	255	262	259	5,7	231	222	224
2,4	259	254	261	6	225	215	212
2,7	259	251	256	6,3	225	228	215
3	257	250	290	6,6	215	228	235
3,3	257	252	283	6,9	231	234	224

O perfil de microdureza da região do passe de acabamento está apresentado na figura 5-22.

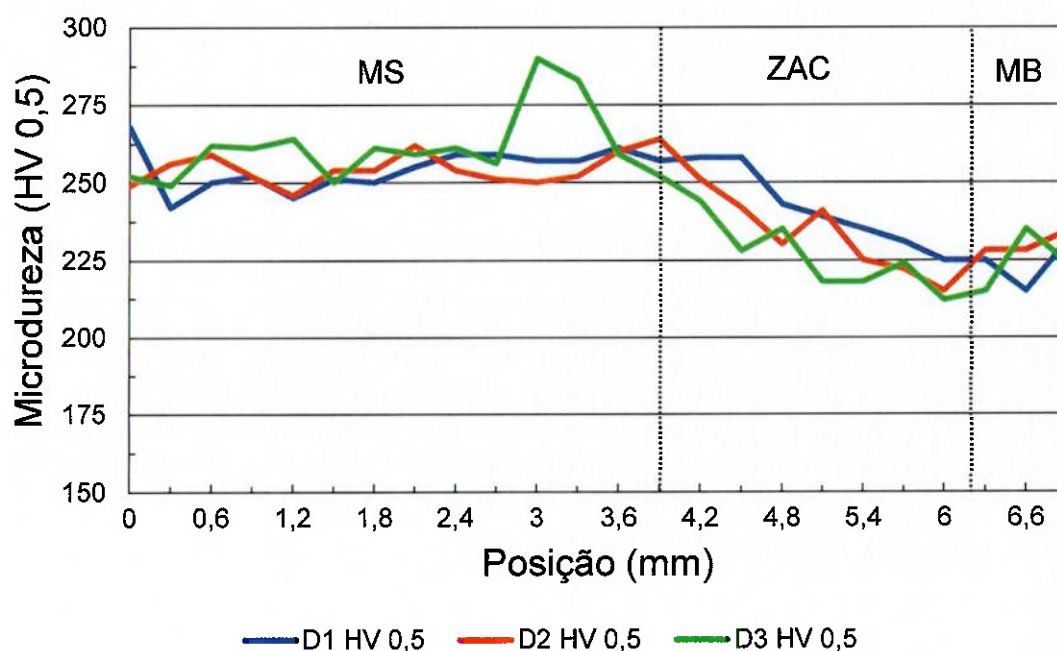


Figura 5-22 Perfil de microdureza de acabamento Sem TT

A figura 5-23 apresenta o mapa de microdureza dos resultados obtidos do corpo de prova TT 900/650. A escala presente na figura 5-23 varia entre 150 e 300 Vickers, utilizando 500 gramas de carga.

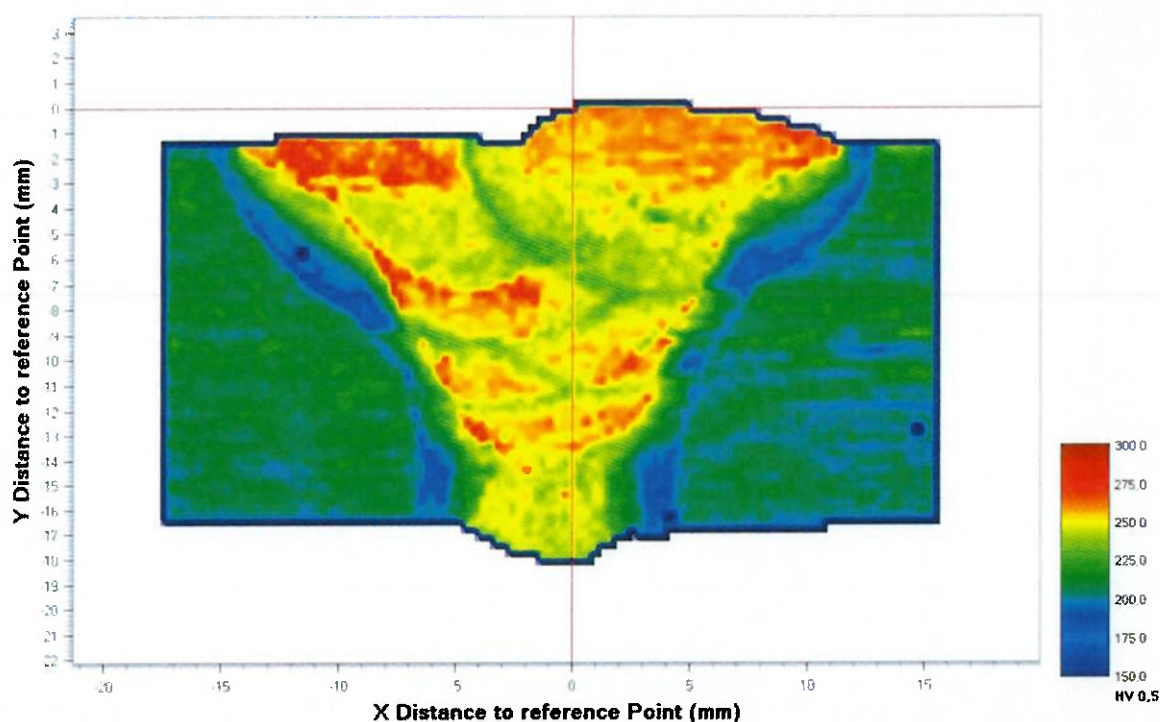


Figura 5-23 Mapa de microdureza da junta soldada em condições TT 900/650

Pode-se observar que as regiões em cor vermelha localizado no metal de solda da junta obtiveram resultados de microdureza superiores às demais regiões do MS, ZAC e MB. O comportamento do perfil de microdureza partindo-se do metal de solda até o metal de base para soldagem multipasse deste aço foi identificado. A tabela 5-8 apresenta os resultados obtidos no último passe de acabamento da apresentada na figura 5-23. Foram coletadas amostras D1, D2 e D2 desde o metal de solda até o metal de base. O eixo da abscissa representa a posição, em milímetros, entre cada ponto indentado de cada amostra.

Tabela 5-8 Resultado de microdureza realizada no passe de acabamento da junta TT 900/650

X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	258	255	248	7,2	257	252	255
0,3	262	256	244	7,5	259	252	255
0,6	262	253	252	7,8	257	265	260
0,9	255	254	251	8,1	254	264	243
1,2	252	254	251	8,4	255	269	225
1,5	257	264	253	8,7	253	268	245
1,8	255	257	257	9	257	275	238
2,1	255	259	253	9,3	265	275	236
2,4	259	264	252	9,6	264	245	225
2,7	254	261	254	9,9	265	247	225
3	251	257	252	10,2	257	241	217
3,3	251	260	252	10,5	264	229	209
3,6	253	261	250	10,8	225	222	208
3,9	255	260	253	11,1	190	201	203
4,2	253	268	252	11,4	193	202	193
4,5	257	260	257	11,7	190	197	190
4,8	257	257	259	12	193	205	207
5,1	262	263	268	12,3	218	217	212
5,4	261	263	262	12,6	212	217	219
5,7	257	264	266	12,9	218	212	210
6	265	260	259	13,2	219	218	214
6,3	261	260	255	13,5	220	219	214
6,6	257	262	247	13,8	218	214	209
6,9	260	251	257	14,1	214	213	218

A partir dos dados da tabela 5-8, um perfil de microdureza foi criado e apresentado na figura 5-24.

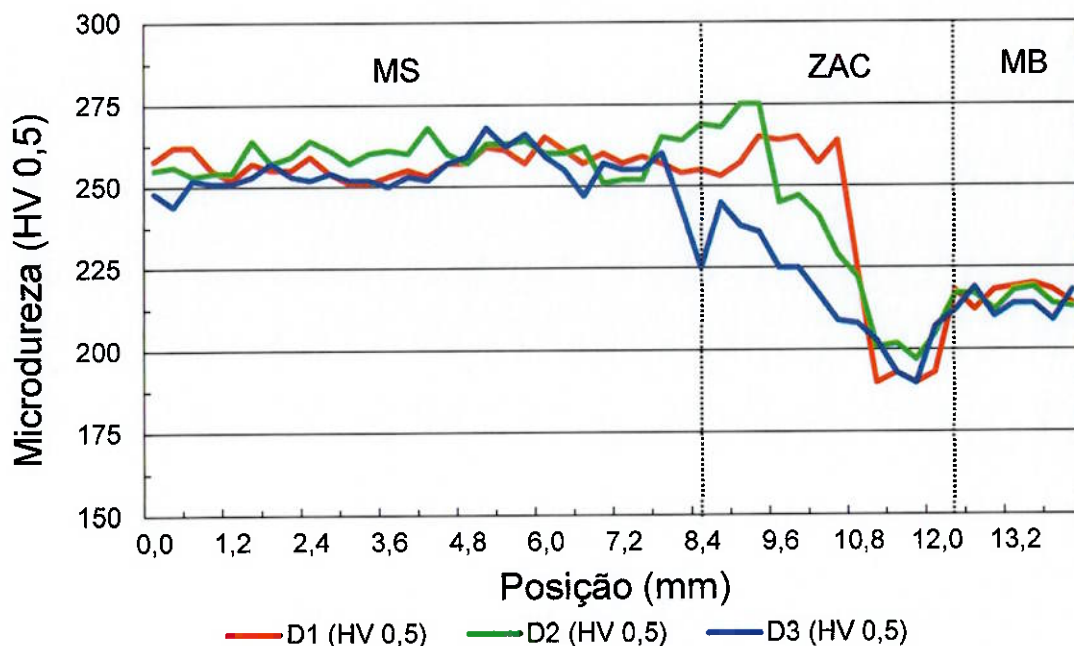


Figura 5-24 Perfil de microdureza do passe de acabamento da junta soldada TT 900/650

Pode-se observar que o metal de solda tem comportamento constante até a posição aproximada de 6,6 mm. A partir deste ponto, a microdureza diminui por estar em região da zona afetada pelo calor. Próximo a região da posição 11 mm há um vale com a menor dureza da ZAC. Após este vale, a região do metal de base é alcançada, atingindo a dureza superior a esta última.

Partindo-se do mesmo princípio, foi realizado o mesmo procedimento para a coleta de resultados da região do passe de enchimento e passe de raiz.

Tabela 5-9 Resultado de microdureza realizada no passe de enchimento da junta TT 900/650

Enchimento TT 900/650							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	258	257	248	4,2	222	220	203
0,3	240	257	255	4,5	217	206	183
0,6	247	258	260	4,8	209	198	192
0,9	254	261	252	5,1	200	207	190
1,2	245	252	259	5,4	202	198	205
1,5	257	255	256	5,7	197	200	202
1,8	256	263	256	6	191	210	202
2,1	255	251	271	6,3	198	206	200
2,4	258	257	280	6,6	206	215	205
2,7	259	235	260	6,9	204	203	211
3	255	255	260	7,2	209	209	202
3,3	239	258	255	7,5	209	209	204
3,6	249	260	229	7,8	208	207	214
3,9	231	226	211	8,1	211	206	210

A partir dos resultados apresentados na tabela 5-9, outro gráfico foi construído com a finalidade de observar o perfil de microdureza do passe de enchimento da junta TT 900/650.

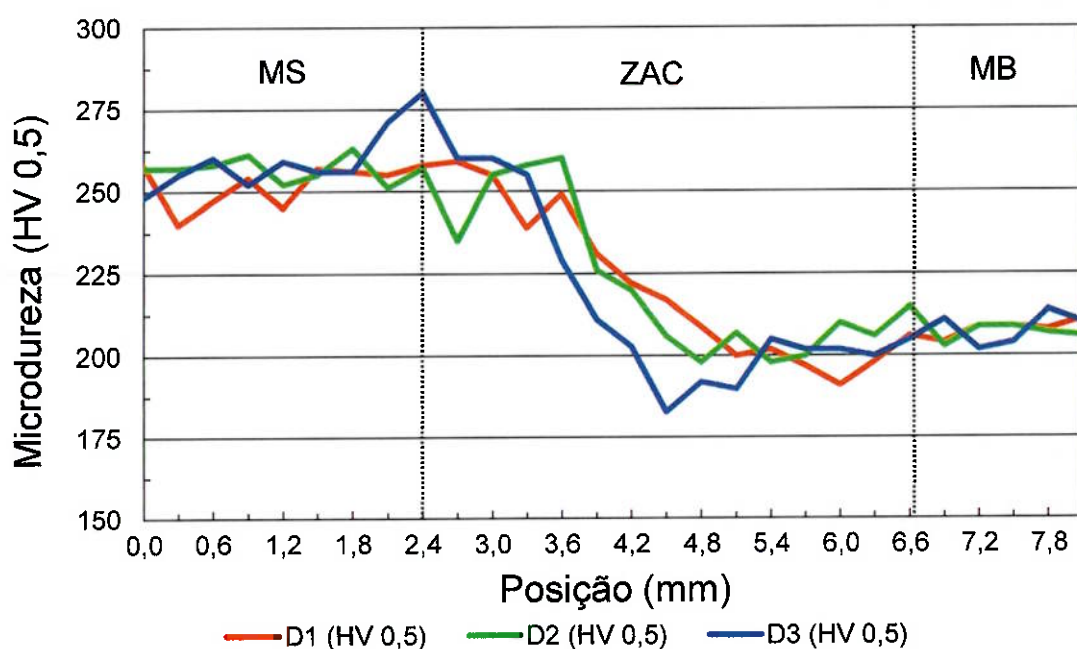


Figura 5-25 Perfil de microdureza do passe enchimento da junta soldada TT900/650

A tabela 5-10 apresenta dos resultados de microdureza realizada na região do passe de raiz da junta TT 900/650.

Tabela 5-10 Resultado de microdureza realizada na raiz da junta TT 900/650

Raiz TT 900/650							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	241	244	242	3,6	189	188	190
0,3	241	239	252	3,9	191	186	188
0,6	255	247	247	4,2	182	189	194
0,9	234	235	245	4,5	191	188	190
1,2	241	239	241	4,8	194	199	204
1,5	244	249	248	5,1	203	202	206
1,8	244	245	249	5,4	200	204	204
2,1	228	228	228	5,7	203	204	207
2,4	226	214	227	6	208	201	205
2,7	214	218	217	6,3	209	202	207
3	203	213	210	6,6	213	204	208
3,3	200	201	199	6,9	214	203	209

A partir dos dados coletados e apresentados na tabela 5-10, foi construído um gráfico do perfil de microdureza encontrado na raiz da junta soldada TT 900/650, representado pela figura 5-26.

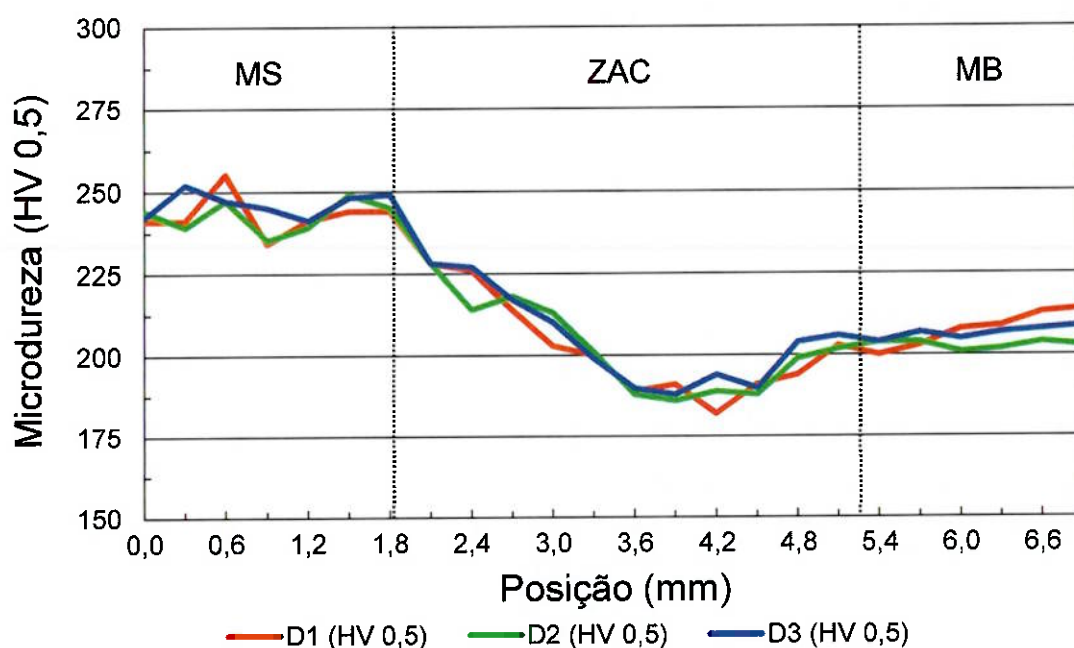


Figura 5-26 Perfil de microdureza do passe de raiz da junta soldada TT 900/650

Os perfis de microdureza das juntas Sem TT e TT 900/650 possuem o mesmo comportamento entre eles. Este fato observado no vale do gráfico é característico de soldagem multipasse, conforme os mapas apresentados. Isto pode ser explicado devido aos passes subsequentes, os quais realizam tratamentos térmicos localizados, promovendo menor dureza na última região da ZAC, isto é, o calor gerado pelos múltiplos passes auxilia no refino dos grãos. Pode-se observar esse fenômeno na região azul do mapa de microdureza da figura 5-19. Além do mais, em soldagem multipasse a transferência de calor deixa de ter comportamento 2D, no passe de raiz, para ter comportamentos 2D e meio a 3D durante o enchimento e acabamento da junta. Esta ideia pode ser explicada ao analisar, a princípio, o perfil de dureza somente do passe de raiz.

O mapa de microdureza da figura 5-27 apresenta somente o ensaio realizado no passe de raiz. [18]

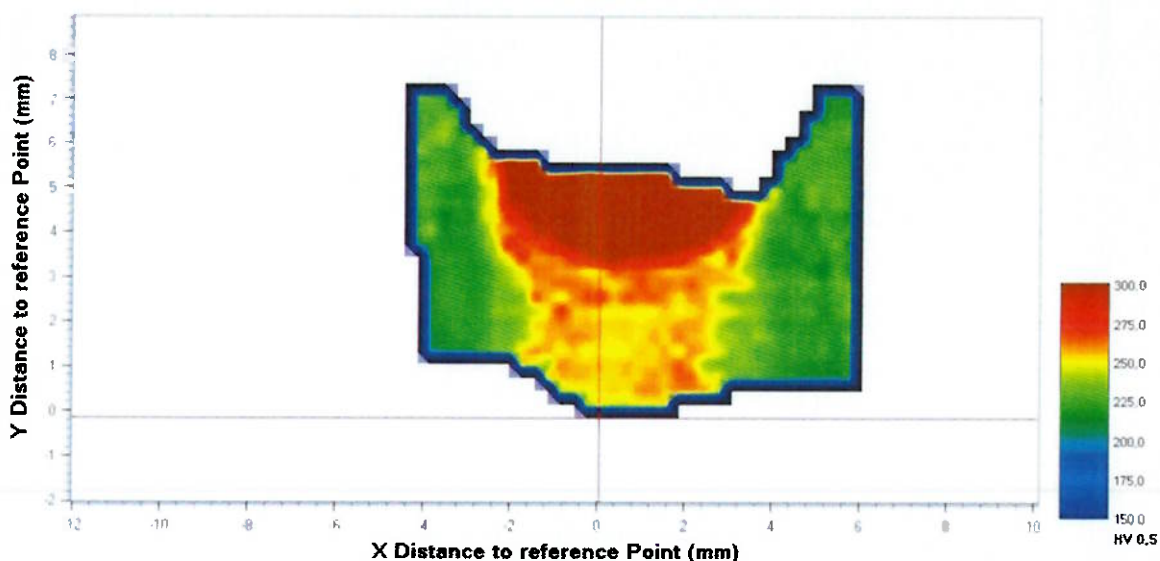


Figura 5-27 Mapa de microdureza do passe de raiz de junta API 5L X80 [18]

Através dos resultados encontrados neste ensaio de microdureza, foi tabelado os resultados partindo-se do metal de solda até o metal de base. A tabela 5-11 apresenta os dados referentes somente ao passe de raiz.

Tabela 5-11 Resultados da microdureza somente do passe de raiz [18]

Somente passe de raiz							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	255	256	251	2,1	249	255	242
0,3	252	255	250	2,4	238	237	240
0,6	254	255	251	2,7	232	230	239
0,9	261	257	255	3	235	232	239
1,2	262	256	255	3,3	222	225	225
1,5	257	261	275	3,6	221	221	221
1,8	257	257	253	3,9	222	225	226

Através dos dados da tabela 5-11, foi construído um gráfico com o perfil de microdureza encontrado. A figura 5-28 representa o perfil de microdureza do passe de raiz de um aço API 5L X80. [18]

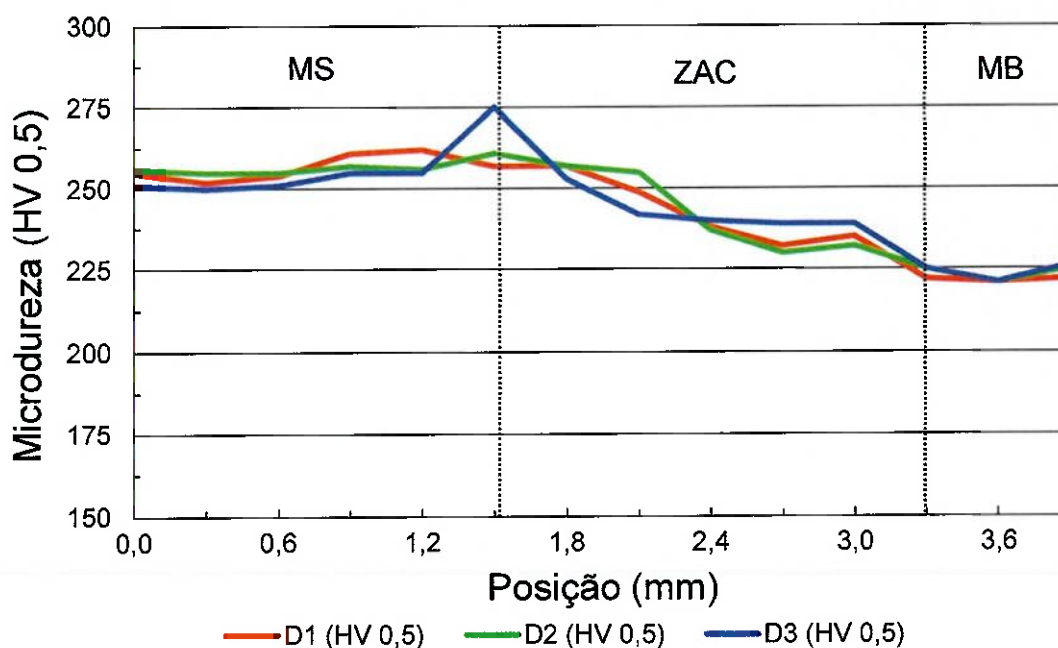


Figura 5-28 Perfil de microdureza somente do passe de raiz [18]

Através dos dados da figura 5-28, percebe-se um comportamento diferente a soldagem multipasse entre o metal de base e a ZAC. O passe de raiz não sofreu influência de outro passe na ZAC, logo seu perfil de dureza decresce desde o metal de solda até o metal de base. Com a aplicação dos passes subsequentes, a zona

afetada pelo calor tende a reduzir dureza, diminuir a resistência a tração e aumentar a tenacidade.

Os mapas de microdureza a seguir são aqueles que sofreram os demais tratamentos térmicos. Observa-se que possuem o mesmo comportamento entre o metal de base e a zona afetada pelo calor. Pode-se identificar através da cor azul, a qual apresenta o menor valor na escala fixada na figura. A junta TT900/500 está apresentada da figura 5-29, a qual recebeu tratamento térmico de têmpera a 900°C e revenimento a 500°C.

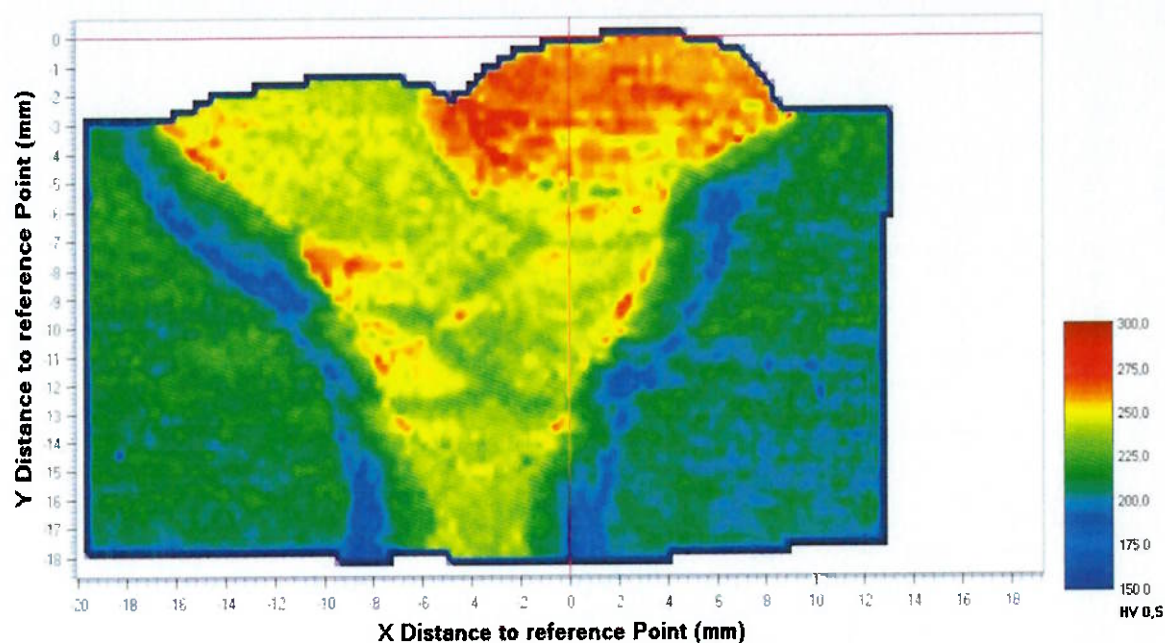


Figura 5-29 Mapa de microdureza da junta 900/500

Os resultados de microdureza na região da raiz da junta TT 900/500 está apresentado na tabela 5-12.

Tabela 5-12 Resultados de microdureza na região da raiz da junta TT900/500.

Raiz TT 900/500							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	235	237	237	3,6	192	186	180
0,3	240	235	247	3,9	190	184	178
0,6	233	237	244	4,2	192	188	191
0,9	237	246	248	4,5	190	200	200
1,2	233	234	233	4,8	201	204	203
1,5	211	216	215	5,1	208	201	211
1,8	216	212	215	5,4	209	203	207
2,1	206	204	205	5,7	206	211	201
2,4	206	202	206	6	205	204	205
2,7	192	197	200	6,3	206	206	210
3	190	182	197	6,6	214	199	212
3,3	188	181	186	6,9	209	194	205

A figura 5-30 representa graficamente os dados da tabela 5-12.

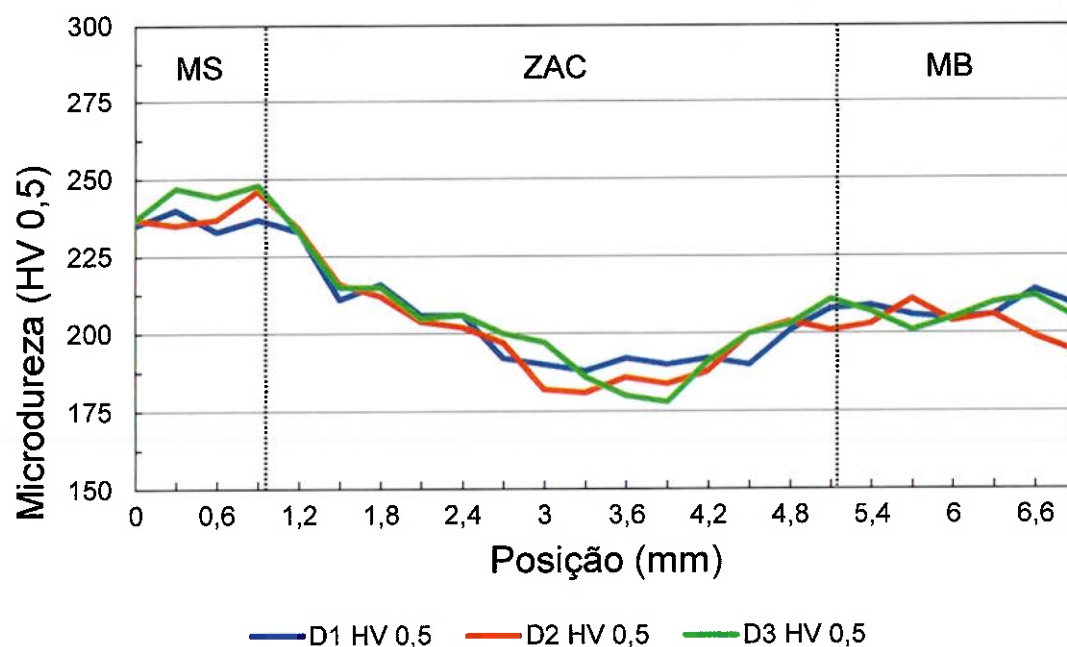


Figura 5-30 Perfil de microdureza da região do passe de raiz da junta soldada TT900/500.

A tabela 5-13 apresenta os resultados de microdureza na região do enchimento da junta TT 900/500.

Tabela 5-13 Resultados de microdureza na região do enchimento da junta TT 900/500.

Enchimento TT 900/500							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	238	240	243	3,6	213	211	208
0,3	235	241	242	3,9	209	208	198
0,6	239	248	241	4,2	207	203	206
0,9	239	241	242	4,5	210	208	195
1,2	236	247	244	4,8	199	197	190
1,5	244	246	254	5,1	190	199	206
1,8	249	253	258	5,4	208	214	203
2,1	263	264	250	5,7	204	209	209
2,4	246	230	232	6	211	220	210
2,7	225	224	223	6,3	199	219	216
3	229	219	224	6,6	211	202	224
3,3	217	219	206	6,9	209	214	208

A figura 5-31 apresenta o gráfico do perfil de microdureza do enchimento da junta TT 900/500.

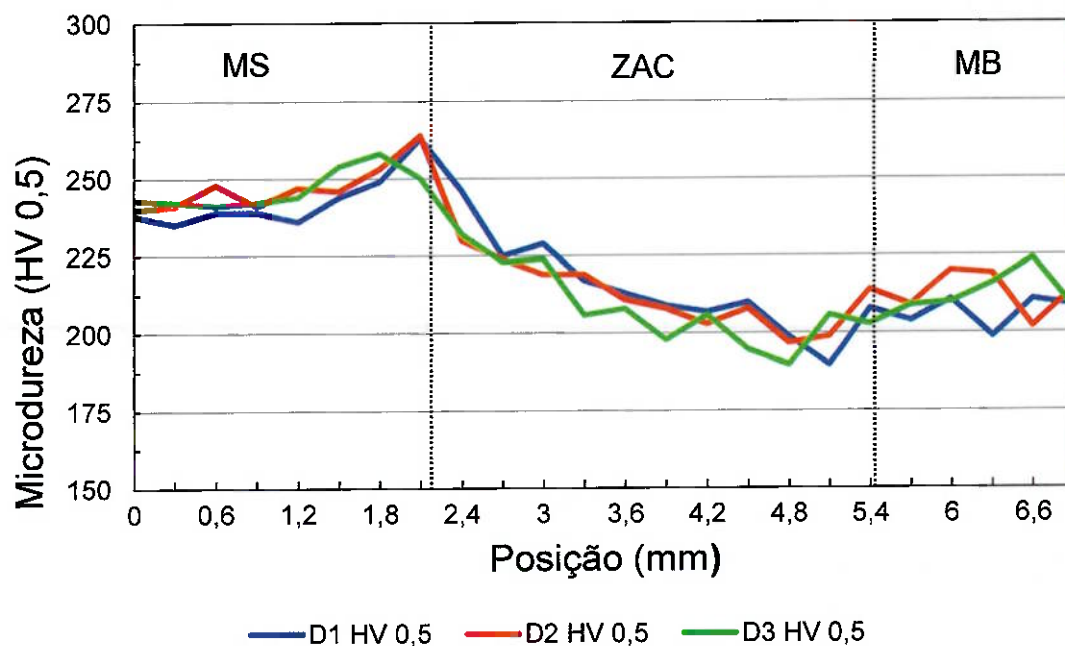


Figura 5-31 Perfil de microdureza da região do cordão de solda de enchimento da junta soldada TT 900/500.

A tabela 5-14 apresenta os resultados de microdureza, entre a região do passe de acabamento até o metal de base, da junta TT 900/500.

Tabela 5-14 Resultados de microdureza na região do acabamento da junta TT 900/500.

Acabamento TT 900/500							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	252	252	252	3,6	258	252	253
0,3	258	247	251	3,9	225	275	246
0,6	261	247	245	4,2	256	257	237
0,9	267	252	264	4,5	264	241	239
1,2	266	257	267	4,8	257	237	228
1,5	266	257	266	5,1	285	225	212
1,8	260	256	259	5,4	271	218	204
2,1	261	254	254	5,7	267	215	207
2,4	253	266	249	6	225	211	198
2,7	257	260	266	6,3	218	215	215
3	254	254	285	6,6	210	221	210
3,3	271	232	275	6,9	213	218	210

O gráfico da figura 5-32 representa os dados da tabela 5-14.

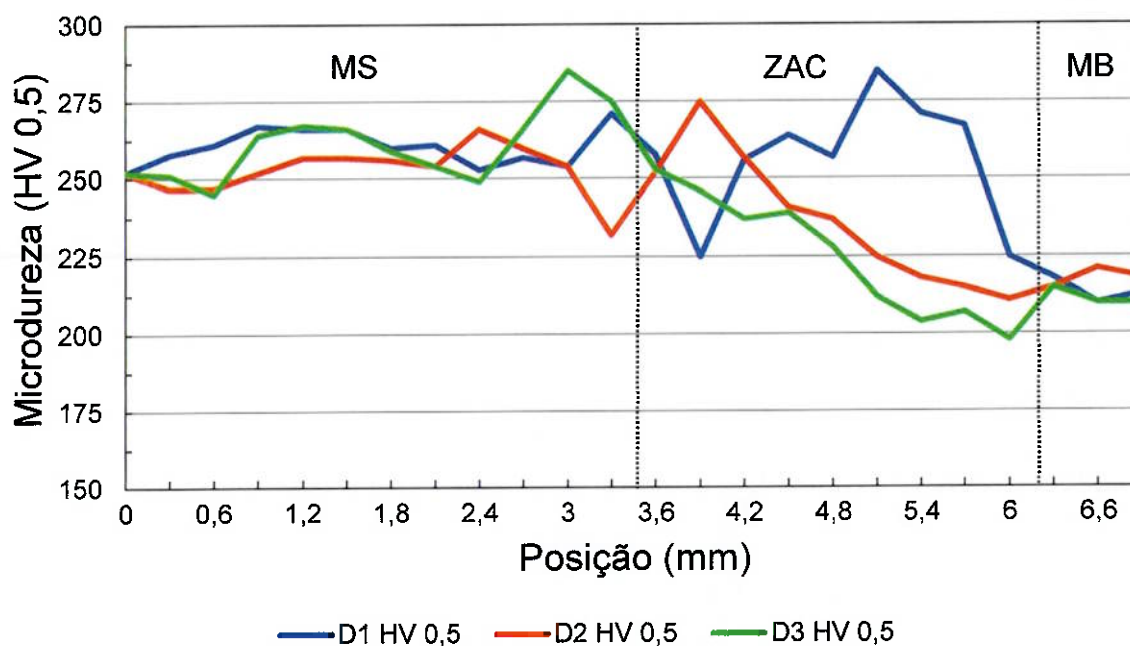


Figura 5-32 Perfil de microdureza da região do cordão de solda de acabamento da junta soldada TT 900/500

O mapa de microdureza das regiões da raiz, enchimento e acabamento da junta TT 1000/500 está apresentado na figura 5-33.

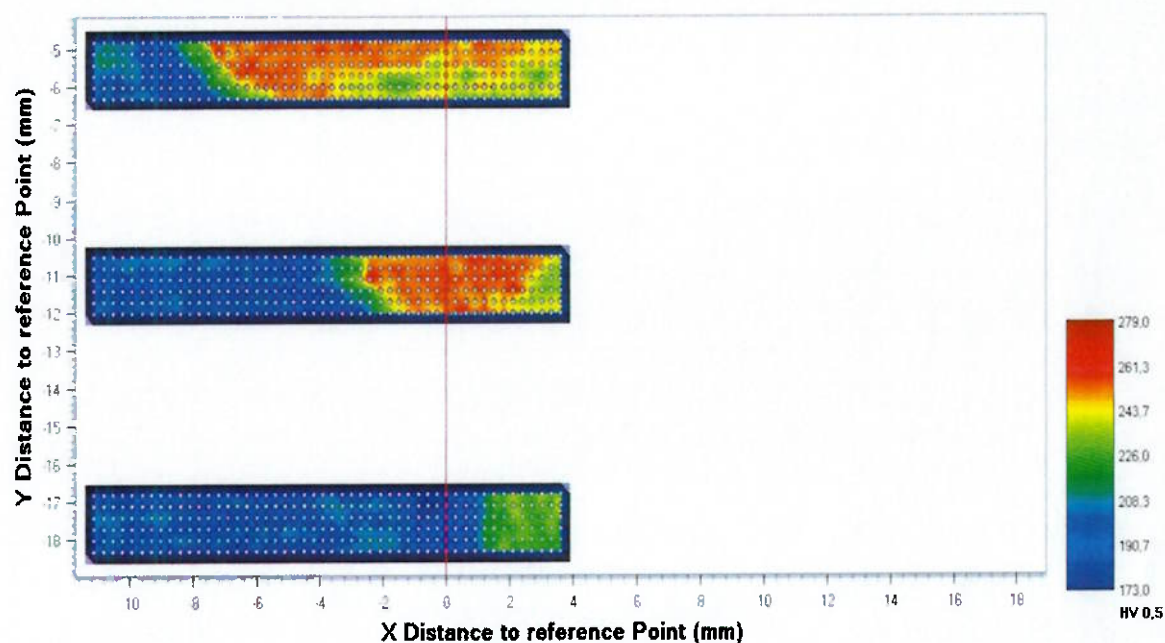


Figura 5-33 Mapa de microdureza das regiões da raiz, enchimento e acabamento da junta TT 1000/500.

Os resultados do ensaio de microdureza está apresentado na tabela 5-15. Os valores foram retirados nas regiões da raiz, enchimento e acabamento, da figura 5-33.

Tabela 5-15 Resultado de microdureza da raiz da junta TT 1000/500

Raiz TT 1000/500							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	235	247	232	3,9	186	173	185
0,3	229	227	233	4,2	178	174	179
0,6	238	233	226	4,5	175	182	177
0,9	227	228	225	4,8	181	193	192
1,2	228	230	232	5,1	190	201	202
1,5	239	237	237	5,4	194	205	203
1,8	225	228	216	5,7	201	210	195
2,1	234	227	224	6	194	210	198
2,4	210	210	211	6,3	196	206	200
2,7	202	198	196	6,6	196	206	198
3	199	185	185	6,9	193	208	209
3,3	193	189	195	7,2	206	209	203
3,6	181	185	191	7,5	204	207	200

A figura 5-34 representa o perfil de microdureza dureza da região da raiz da junta TT 1000/500.

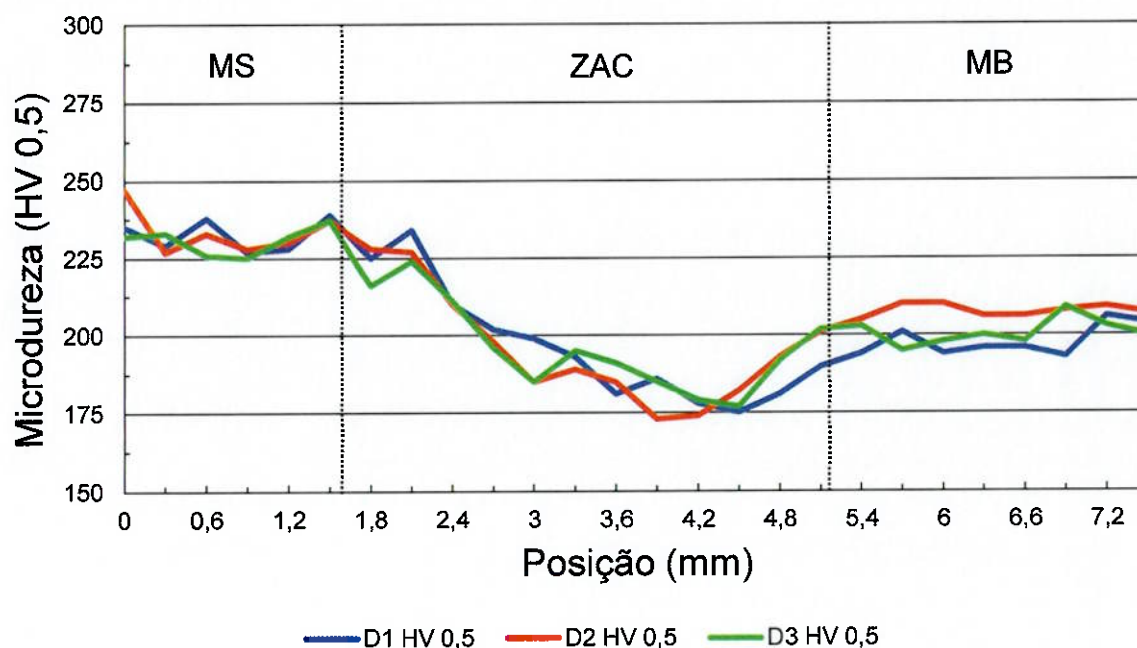


Figura 5-34 Perfil de microdureza da raiz da junta TT 1000/500

Os resultados de microdureza do enchimento da junta TT 1000/500 estão apresentados na tabela 5-16.

Tabela 5-16 Resultado de microdureza do enchimento da junta TT 1000/500

Enchimento TT 1000/500							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	254	256	258	3,9	209	202	210
0,3	253	255	254	4,2	197	193	208
0,6	251	253	258	4,5	202	193	192
0,9	251	253	255	4,8	191	191	186
1,2	253	253	252	5,1	181	183	199
1,5	245	258	256	5,4	187	197	206
1,8	247	257	246	5,7	209	194	202
2,1	250	250	255	6	199	200	201
2,4	250	259	245	6,3	202	208	203
2,7	241	218	239	6,6	197	198	195
3	234	217	231	6,9	207	200	194
3,3	224	213	224	7,2	207	200	197
3,6	217	210	208	7,5	208	207	197

O gráfico da figura 5-34 apresenta o perfil de microdureza da região da raiz da junta TT 10000/500.

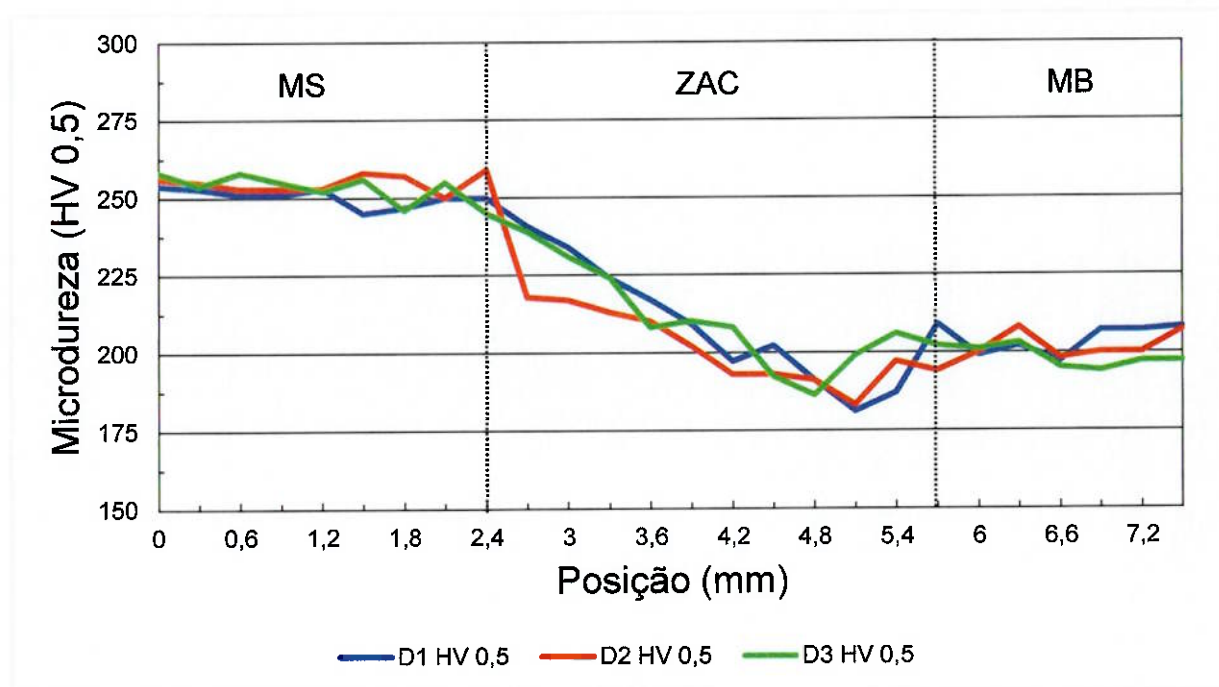


Figura 5-35 Perfil de microdureza do enchimento da junta TT 1000/500

Os resultados de microdureza do acabamento da junta TT 1000/500 estão apresentados na tabela 5-17.

Tabela 5-17 Resultado de microdureza do acabamento da junta TT 1000/500

Acabamento TT1000/500							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	251	252	250	3,9	263	224	226
0,3	256	257	250	4,2	224	224	220
0,6	254	254	251	4,5	234	221	211
0,9	251	250	254	4,8	216	207	196
1,2	254	255	251	5,1	210	190	187
1,5	256	250	257	5,4	198	188	192
1,8	256	251	251	5,7	195	187	181
2,1	256	255	248	6	184	188	204
2,4	252	252	257	6,3	214	205	209
2,7	245	252	257	6,6	206	210	210
3	258	251	250	6,9	209	212	211
3,3	252	239	259	7,2	213	209	217
3,6	255	235	227	7,5	202	212	208

A figura 5-36 apresenta o perfil de microdureza da região do passe de acabamento da junta TT 1000/500.

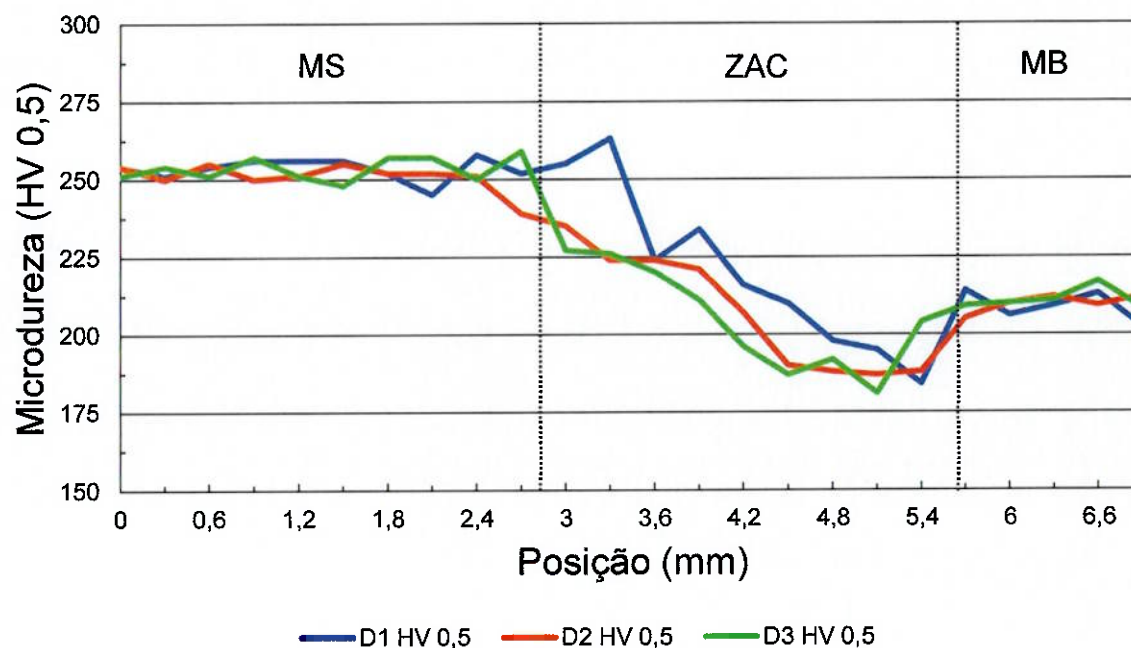


Figura 5-36 Perfil de microdureza do acabamento da junta TT 1000/500

A figura 5-37 apresenta o mapeamento de microdureza das seguintes regiões: raiz, enchimento e acabamento.

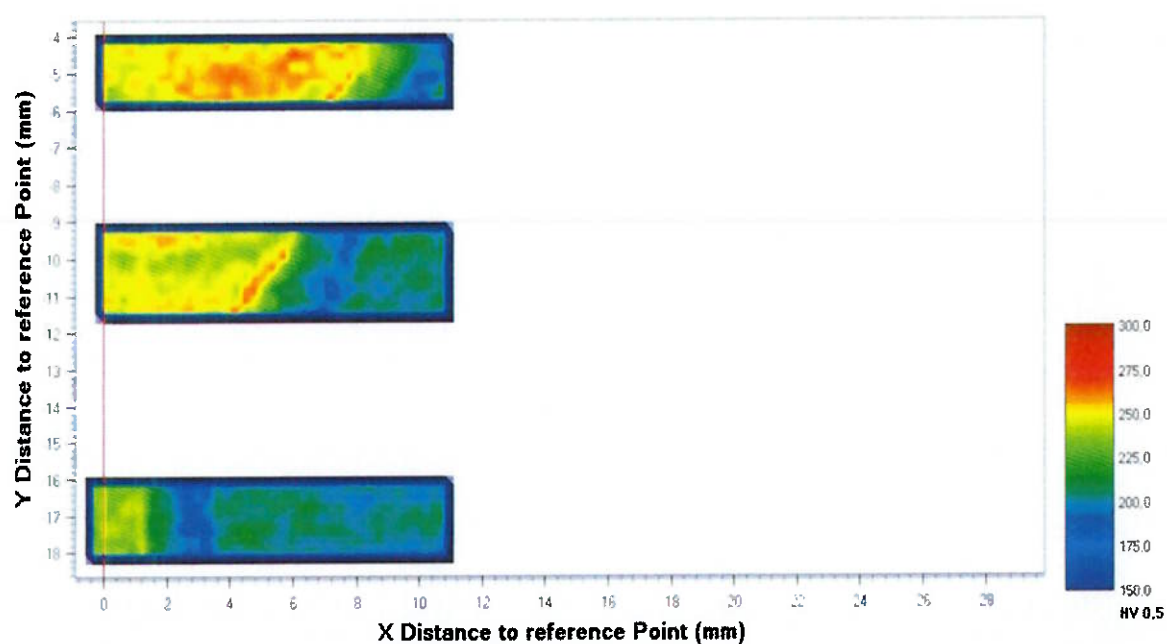


Figura 5-37 Mapeamento microdureza de raiz, enchimento e acabamento da junta TT 1000/650

A tabela 5-18 apresenta resultados coletados na região do passe de raiz da junta TT 1000/650.

Tabela 5-18 Resultados de microdureza da região do passe de raiz da junta TT 1000/650

Raiz TT 1000/650							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	248	253	264	3	261	252	230
0,3	246	250	261	3,3	259	243	228
0,6	252	247	253	3,6	239	237	224
0,9	250	260	260	3,9	218	206	202
1,2	256	255	255	4,2	201	198	195
1,5	254	243	251	4,5	194	187	180
1,8	252	252	253	4,8	195	185	183
2,1	250	257	258	5,1	207	206	200
2,4	266	257	247	5,4	221	208	206
2,7	255	258	259	5,7	217	208	207

A figura 5-38 apresenta o perfil de microdureza da região do passe de raiz da junta TT 1000/650, a partir do metal de solda até o metal de base.

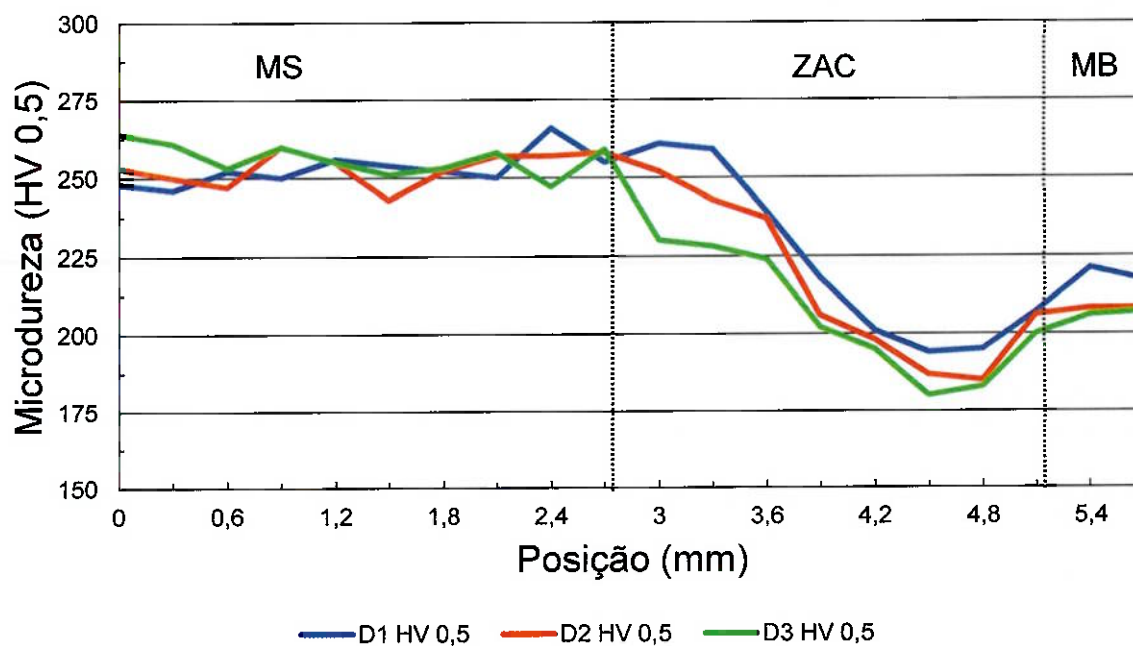


Figura 5-38 Perfil de microdureza da região do passe de raiz da junta TT 1000/650

A tabela 5-19 apresenta os resultados de microdureza da região do passe de enchimento da junta TT 1000/650.

Tabela 5-19 Resultados de microdureza da região dos passes de enchimento da junta TT 1000/650.

Enchimento TT1000/650							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	247	234	245	3	214	217	218
0,3	253	247	247	3,3	207	215	203
0,6	250	248	250	3,6	205	209	199
0,9	255	241	252	3,9	185	191	186
1,2	239	245	253	4,2	198	196	204
1,5	241	252	257	4,5	203	205	208
1,8	242	250	271	4,8	205	195	210
2,1	235	247	252	5,1	206	199	207
2,4	239	265	232	5,4	206	203	206
2,7	209	233	221	5,7	208	194	205

A figura 5-39 apresenta o gráfico do perfil de microdureza da junta TT 1000/650, partindo-se do metal de solda até o metal de base.

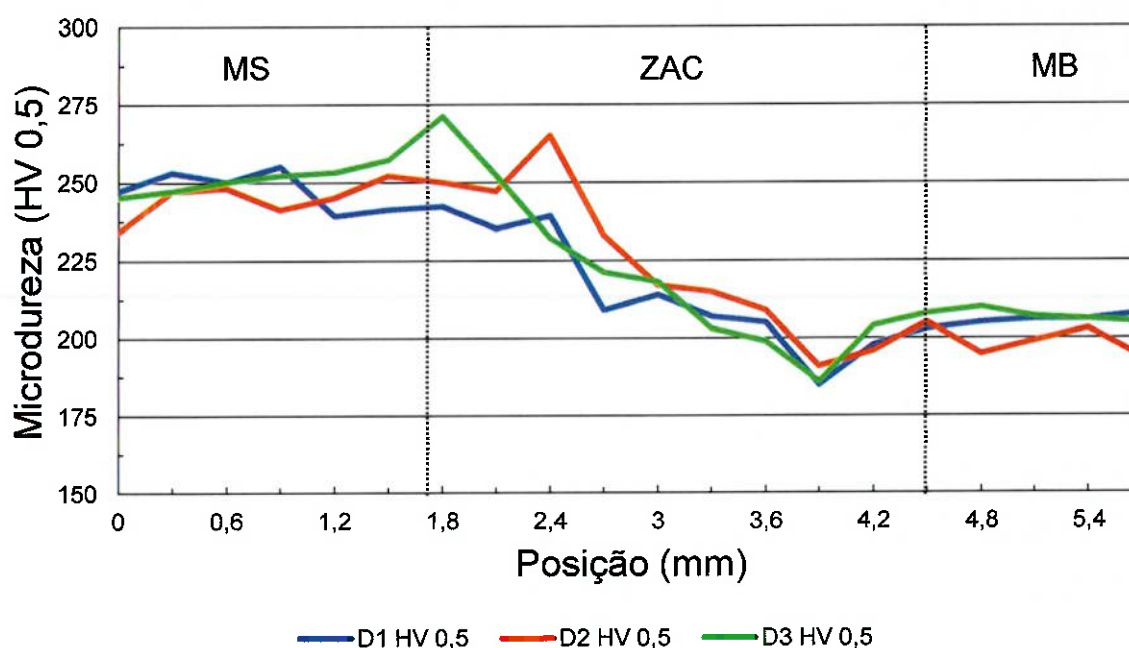


Figura 5-39 Perfil de microdureza do passe de enchimento da junta TT 1000/650

A tabela 5-20 reúne os resultados de microdureza da região do passe de acabamento da junta TT 1000/650.

Tabela 5-20 Resultados de microdureza da região do passe de acabamento da junta TT 1000/650.

Acabamento TT 1000/650							
X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)	X (mm)	D1 HV (0,5)	D2 HV (0,5)	D3 HV (0,5)
0	232	243	241	3	189	192	189
0,3	241	235	239	3,3	197	195	192
0,6	240	239	241	3,6	189	187	199
0,9	239	243	245	3,9	199	199	192
1,2	234	247	241	4,2	194	209	211
1,5	227	242	235	4,5	209	203	207
1,8	224	214	208	4,8	211	199	207
2,1	215	223	214	5,1	195	206	201
2,4	198	213	211	5,4	205	211	213
2,7	203	198	200	5,7	203	210	212

Através dos dados da tabela 5-20, foi feito o perfil de microdureza da região do passe de acabamento da junta TT 1000/650.

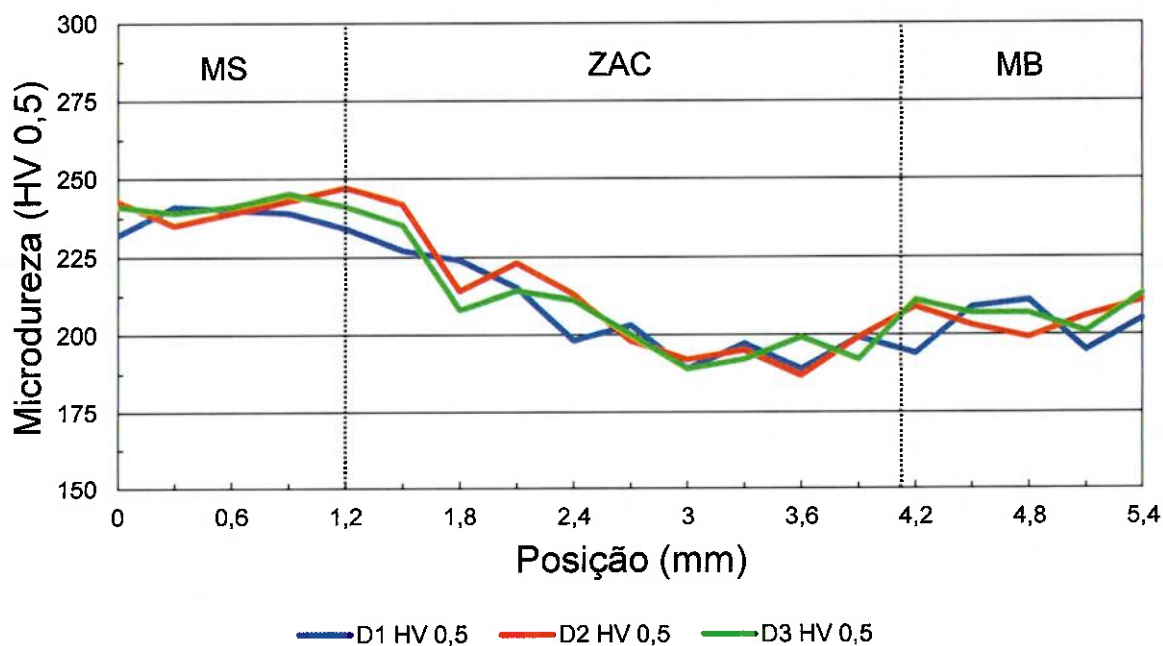


Figura 5-40 Perfil de microdureza da região do passe de acabamento da junta TT 1000/650.

5.5. Ensaio de impacto Charpy "V"

Os resultados dos ensaios Charpy "V" foram divididos por temperatura de realização do ensaio e estão apresentados a seguir.

5.5.1. Resultado do Ensaio Charpy "V" na temperatura de -40°C no metal de solda.

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy "V", as respectivas médias e desvios padrão, realizados a temperatura de -40°C estão apresentados na tabela 5-21.

Tabela 5-21 Resultados do ensaio de impacto Charpy realizados no MS a -40°C

Resultado Impacto Charpy no MS a -40°C			
CP	Nº	Resultado (J)	Média (J)
MB	1	270	270 ± 0,00
	2	270	
	3	270	
Sem TT	1	46	48 ± 9,71
	2	40	
	3	59	
900/650	1	18	18 ± 2,00
	2	16	
	3	20	
900/500	1	21	26 ± 9,87
	2	37	
	3	19	
1000/500	1	44	38 ± 4,93
	2	36	
	3	35	
1000/650	1	38	27 ± 12,90
	2	13	
	3	31	

A figura 5-41 representa graficamente os resultados dos ensaios de impacto Charpy "V" realizados no metal de solda (MS) a temperatura de -40°C apresentados na tabela 5-21. A linha em vermelho representa o valor mínimo exigido pela norma API 5L para o metal de base (40 J). A linha em cor verde representa o resultado médio do ensaio de impacto Charpy realizado no metal de base.

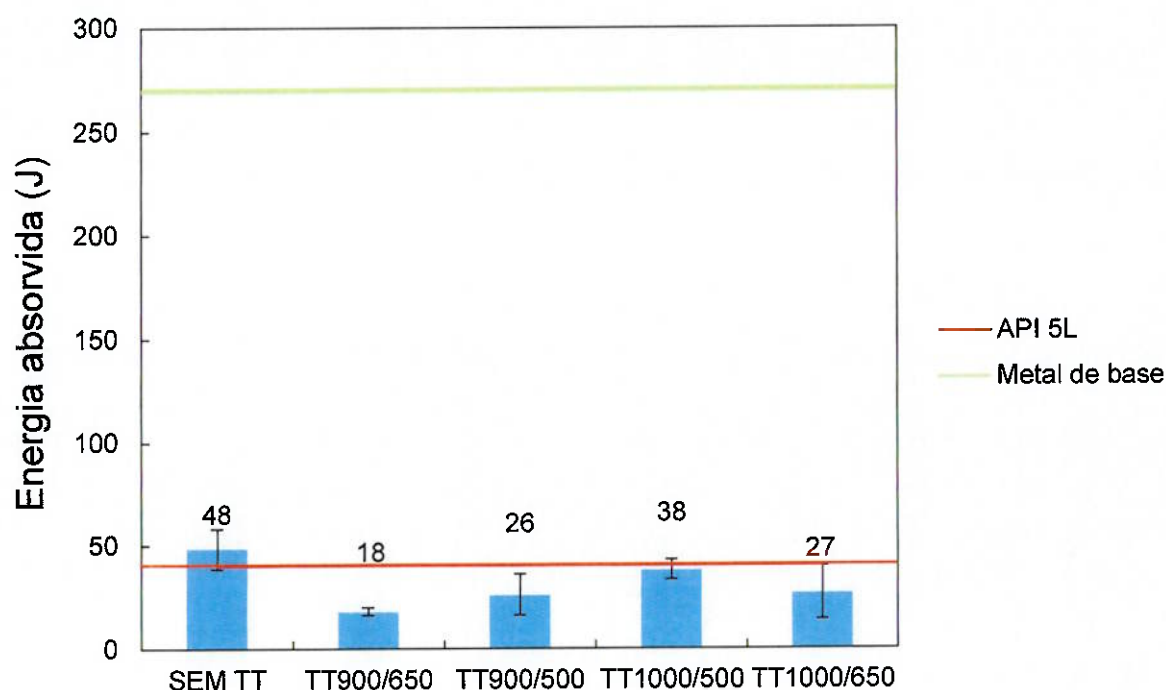


Figura 5-41 - Resultado do ensaio Charpy a -40°C no metal de solda

Pode-se observar que a energia absorvida pelos corpos de prova sem tratamento térmico é maior que a energia absorvida nos demais corpos de provas tratados termicamente. A energia absorvida no ensaio Charpy do corpo de prova sem tratamento térmico é 82% menor que a energia absorvida pelo metal de base. Entretanto, o Sem TT está aprovado, segundo as especificações da API 5L, superando, em aproximados 17%, em relação ao sugerido por norma. Entretanto, o resultado de Sem TT é aproximadamente 82% em relação a energia absorvida pelo metal de base.

Estatisticamente, para realizar as comparações entre os resultados do ensaio Charpy "V" dos experimentos, foi realizada a análise de variância para identificar se os grupos são semelhantes ou não. A tabela 5-22 apresenta a estatística descritiva dos resultados coletados.

Tabela 5-22 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados no MS a -40°C

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Sem TT	3	145	48,33	94,33
TT900/650	3	54	18,00	4,00
TT900/500	3	77	25,67	97,33
TT1000/500	3	115	38,33	24,33
TT1000/650	3	82	27,33	166,33

A tabela 5-23 apresenta a análise de variância realizada com os resultados dos ensaios de impacto Charpy "V" no MS a temperatura de -40°C.

Tabela 5-23 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados no MS a -40°C

ANOVA – Ensaio de Impacto Charpy "V" MS -40°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1691,07	4,00	422,77	5,47	0,01	3,48
Dentro dos grupos	772,67	10,00	77,27			
Total	2463,73	14,00				

Conforme análise de variância, F sendo maior que F crítico, indica que há pelo menos uma média diferente. Então, o Teste Tukey foi realizado para identificar quais grupos são iguais e quais são diferentes, comparando-os dois a dois. A tabela 5-24 apresenta os dados para a realização do teste Tukey.

Tabela 5-24 Dados Teste Tukey

$q_{k,v,\alpha}$	4,65
s_r^2	77,27
n	3,00
$q_{k,v,\alpha} \sqrt{\frac{s_r^2}{n}}$	23,60

Aplicando os dados fornecidos pela tabela 5-24 e 5-22 na equação abaixo, foram obtidos resultados, apresentados na tabela 5-25.

$$|\bar{x}_l - \bar{x}_m| > q_{k,v,\alpha} \sqrt{\frac{s_r^2}{n}} \quad (5-1)$$

Tabela 5-25 Diferença e igualdade entre os resultados do ensaio de impacto Charpy "V" do MS a -40°C

Diferença e igualdade entre os TT e o Sem TT			
Sem TT	48,33	TT900/650	18,00
TT900/650	18,00	TT1000/500	38,33
$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	30,33	$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	20,33
Sem TT	48,33	TT900/650	18,00
TT900/500	25,67	TT1000/650	27,33
$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	22,67	$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	9,33
Sem TT	48,33	TT900/500	25,67
TT1000/500	38,33	TT1000/500	38,33
$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	10,00	$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	12,67
Sem TT	48,33	TT900/500	25,67
TT1000/650	27,33	TT1000/650	27,33
$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	21,00	$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	1,67
TT900/650	18,00	TT1000/500	38,33
TT900/500	25,67	TT1000/650	27,33
$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	7,67	$ \bar{x}_l - \bar{x}_m $	11,00

A tabela 5-25 apresenta, em vermelho, a diferença entre as médias Sem TT e TT900/650 em módulo. O valor 30,33 é maior que a diferença média significativa de 23,60, apresentada na tabela 5-14. Então há diferença significativa entre as médias, ao nível $\alpha = 5\%$ de confiabilidade. Entretanto, as demais comparações, identificadas em azul, apresentam valores inferiores a 26,30 e, portanto, não há diferença significativa entre os valores supracitados.

Observa-se que os resultados do ensaio Charpy, realizados no metal de solda a temperatura de -40°C, de Sem TT está aprovado por norma. Entretanto, o resultado é estatisticamente semelhante aos resultados de TT900/500 e TT1000/500, os quais não satisfazem os requisitos mínimos exigidos pela especificação API 5L.

5.5.2. Ensaio de impacto Charpy realizados a 0°C no metal de solda.

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy "V" realizados no metal de solda a temperatura de 0°C bem como suas respectivas médias e desvios padrão foram apresentados na tabela 5-26.

Tabela 5-26 Resultado do Ensaio de Impacto Charpy realizado no MS a 0°C

Resultado Impacto Charpy no MS a 0°C			
CP	Nº	Resultado (J)	Média (J)
Metal de base	1	292	292 ± 0,00
	2	292	
	3	292	
Sem TT	1	87	89 ± 3,46
	2	93	
	3	87	
TT900/650	1	69	68 ± 1,73
	2	69	
	3	66	
TT900/500	1	59	59 ± 0,58
	2	59	
	3	58	
TT1000/500	1	73	81 ± 10,58
	2	77	
	3	93	
TT1000/650	1	66	69 ± 4,62
	2	74	
	3	66	

A partir dos dados apresentados na tabela 5-26, foi feito um gráfico, conforme a figura 5-42, comparando os resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados no metal de solda a temperatura de 0°C. A linha em verde, representa o resultado do ensaio Charpy a temperatura de 0°C do metal de base e a linha vermelha representa o requisito mínimo exigido pela norma API 5L.

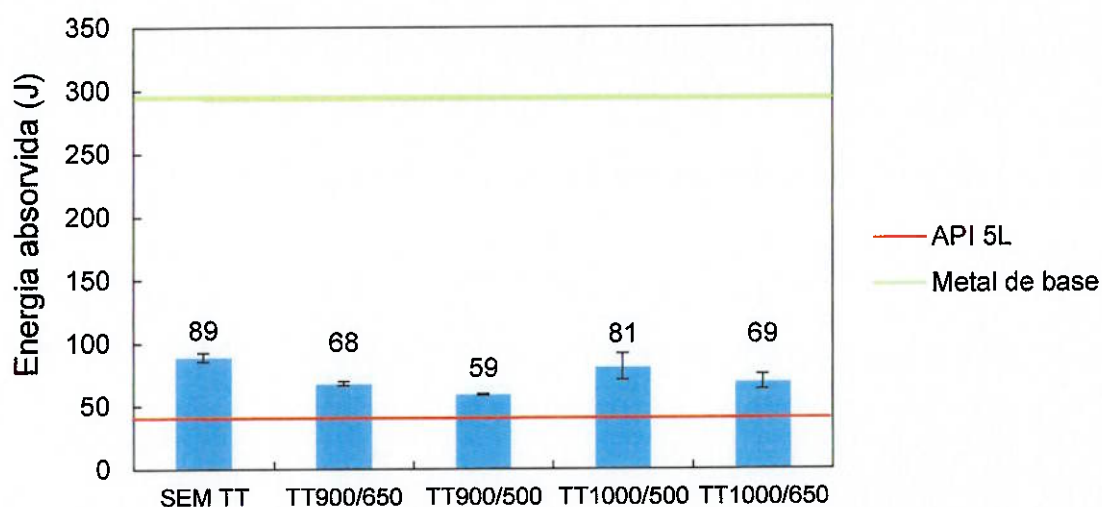


Figura 5-42 Resultado do ensaio Charpy a 0°C no metal de solda

A figura 5.42 apresenta as mesmas condições apresentadas na figura 5.41, entretanto utilizando uma temperatura de ensaio a 0°C. Os resultados dos ensaios estão aprovados, conforme a API 5L. Observando-se o gráfico, o tratamento térmico 900/500 foi o menor, aproximadamente 59J, porém 32% maior que a energia absorvida solicitada pela API 5L, aproximadamente 34% menor que o Sem TT e 80% menor que a energia absorvida pelo metal de base.

Analisando os resultados estatisticamente através da análise de variância, temos:

Tabela 5-27 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados no MS a 0°C.

RESUMO - Ensaio de impacto Charpy MS 0°C				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Sem TT	3	267	89,00	12,00
TT900/650	3	204	68,00	3,00
TT900/500	3	176	58,67	0,33
TT1000/500	3	243	81,00	112,00
TT1000/650	3	206	68,67	21,33

A partir da tabela 5-27, a análise de variância foi feita e tabelada, de acordo com tabela 5-28.

Tabela 5-28 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados no MS a 0°C

ANOVA – Ensaio de impacto Charpy MS 0°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1707,60	4	426,90	14,36	0,00038	3,48
Dentro dos grupos	297,33	10	29,73			
Total	2004,93	14				

De acordo com o resultado do teste de hipóteses, ANOVA, observa-se que há pelo menos um grupo diferente, entre aqueles analisados, devido ao valor F ser maior que o F crítico ou o valor P de probabilidade ser menor que o valor de confiabilidade do teste.

Tabela 5-29 Resultados do Teste de Tukey referentes aos dados do ensaio de impacto Charpy realizado no MS a 0°C

Sem TT	89,00	TT900/650	68,00
TT900/650	68,00	TT1000/500	81,00
$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	21,00	$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	13,00
Sem TT	89,00	TT900/650	68,00
TT900/500	58,67	TT1000/650	68,67
$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	30,33	$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	0,67
Sem TT	89,00	TT900/500	58,67
TT1000/500	81,00	TT1000/500	81,00
$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	8,00	$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	22,33
Sem TT	89,00	TT900/500	58,67
TT1000/650	68,67	TT1000/650	68,67
$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	20,33	$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	10,00
TT900/650	68,00	TT1000/500	81,00
TT900/500	58,67	TT1000/650	68,67
$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	9,33	$ \bar{x}_L - \bar{x}_m $	12,33

Conforme a tabela 5-29, obtida através do Teste Tukey, não existe diferença, ao nível de $\alpha = 5\%$, entre os resultados Sem TT e TT1000/500. Neste mesmo sentido, os pares TT900/650 e TT900/500CV5, TT900/650 e TT1000/500, TT900/650 e TT1000/650, TT900/500 e TT1000/650, TT1000/500 e TT1000/650 são estatisticamente iguais porém diferentes do Sem TT ao nível de confiabilidade de $\alpha = 5\%$. Portanto, para configuração de ensaio de impacto Charpy no MS a 0°C, o Sem TT e TT900/500 se destacam com maior absorção de energia e são 70% e 72%, respectivamente, menores em relação a energia absorvida pelo metal de base e, 55% e 51%, respectivamente, maiores em relação a norma API 5L.

5.5.3. Ensaio realizado na ZAC a -40°C.

Os resultados dos ensaios de impacto realizados na ZAC com temperatura de -40°C estão apresentados na tabela 5-30.

Tabela 5-30 Resultado dos Ensaio de Impacto Charpy realizados na ZAC a -40°C

Resultado Impacto Charpy na ZAC a -40°C			
CP	Nº	Resultado (J)	Média (J)
Metal de base	1	270	270 ± 0,00
	2	270	
	3	270	
Sem TT	1	175	170 ± 6,43
	2	163	
	3	173	
TT900/650	1	228	174 ± 60,99
	2	108	
	3	187	
TT900/500	1	171	181 ± 29,31
	2	158	
	3	214	
TT1000/500	1	32	46 ± 12,50
	2	55	
	3	52	
TT1000/650	1	50	49 ± 1,15
	2	48	
	3	50	

Partindo-se dos resultados apresentados na tabela 5-30, um gráfico foi construído para melhor visualizar as diferenças dos resultados para cada temperatura de tratamento térmico de têmpera e revenimento. A linha verde presente no gráfico representa a energia absorvida de 270 Joules, a temperatura de -40°C pelo metal de base. Já a linha vermelha, representa o valor mínimo de 40 Joules, exigida pela norma API 5L, da energia absorvida.

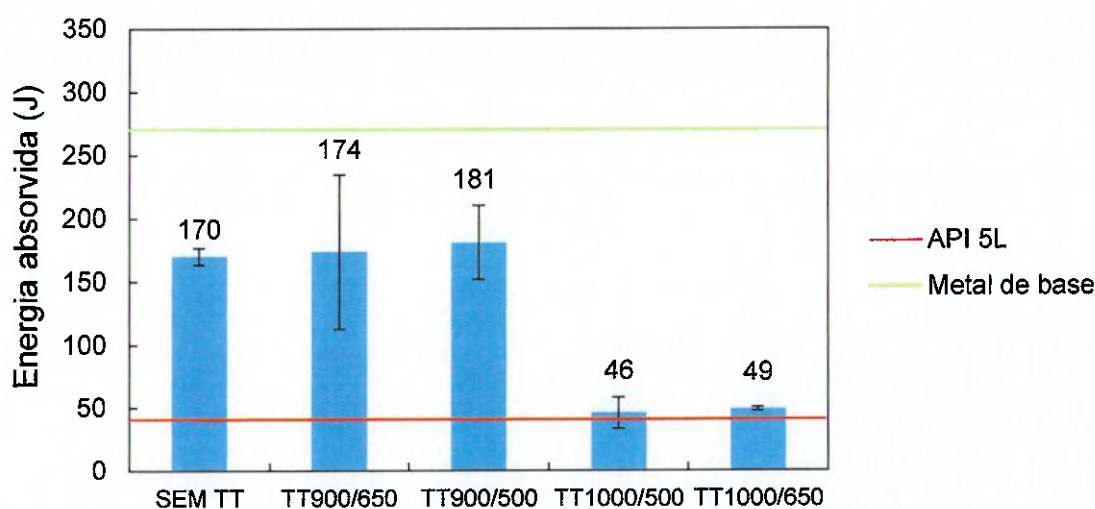


Figura 5-43 Resultado do ensaio Charpy a -40°C na ZAC

A figura 5.43 representa os resultados dos ensaios de impacto Charpy, realizados na ZAC, em diversos tratamentos térmicos. A melhor condição, baseando-se no gráfico, o TT 900/500 é 77% maior que a energia absorvida regida pela API 5L e a condição menos apreciada, porém aprovada, é a TT 1000/500, com absorção de energia de 46J, 13% maior que a requerida pela norma. Entretanto, TT 900/500 e TT 1000/500 são, respectivamente, 33% e 83% menores que a energia absorvida pelo metal de base a temperatura de ensaio a -40°C.

Para uma análise sistêmica dos resultados obtidos neste ensaio de impacto Charpy, foi realizada a análise de variância dos dados encontrados. A tabela 5-31 apresenta o resumo dos dados utilizados na análise de variância dos resultados do ensaio de impacto. Observa-se que os Sem TT, TT900/650 e TT900/500 foram analisados devido à proximidade dos valores, isto é, estão a uma ordem de grandeza acima em relação aos outros tratamentos térmicos. Entretanto foi realizado uma análise para os TT1000/500 e TT1000/650.

Tabela 5-31 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados na ZAC a -40°C

RESUMO - Ensaio de impacto Charpy a -40°C - ZAC				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Sem TT	3	511	170,33	41,33
TT900/650	3	523	174,33	3720,33
TT900/500	3	543	181,00	859,00

A partir da tabela 5-31, a análise de variância, ANOVA, foi realizada e apresentada na tabela 5-32.

Tabela 5-32 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados na ZAC a -40°C

ANOVA - Ensaio de impacto Charpy a -40°C - ZAC						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	174,22	2	87,11	0,06	0,95	5,14
Dentro dos grupos	9241,33	6	1540,22			
Total	9415,56	8				

Conforme a análise de variância e, segundo a tabela 5-32, observa-se que o F é menor que o F crítico. Então podemos concluir que ao nível de significância de $\alpha = 5\%$, os valores estudados não tem diferença significativa. Então Sem TT, TT900/650 e TT900/500 são semelhantes, e respectivamente 37%, 35% e 33% menores que o resultado de energia absorvida pelo metal de base e 76%, 77% e 78% maiores que a energia absorvida de 40 Joules requerida pela API 5L.

A tabela 5-33 apresenta os resultados de TT1000/500 e TT1000/650 dos quais foram obtidos resultados de energia absorvida com uma ordem de grandeza a menos.

Tabela 5-33 Resultados TT1000/500 e TT1000/650

TT1000/500 (J)	TT1000/650 (J)
32	50
55	48
52	50

A partir dos dados da tabela 5-33, foi realizada a análise de variância (ANOVA), com a finalidade de descobrir, estatisticamente, se os resultados são semelhantes. A tabela 5-34 apresenta o resumo da estatística descritiva a partir de dados da tabela 5-33.

Tabela 5-34 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados na ZAC a -40°C – TT 1000/500 e TT 1000/650

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
TT 1000/500	3	139	46,33	156,33
TT 1000/650	3	148	49,33	1,33

A tabela 5-35 apresenta a ANOVA referente aos resultados de TT 1000/500 e TT 1000/650.

Tabela 5-35 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados na ZAC a -40°C - TT 1000/500 e TT 1000/650

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	13,50	1	13,50	0,17	0,70	7,71
Dentro dos grupos	315,33	4	78,83			
Total	328,83	5				

Segundo a tabela 5-35, referente a análise de variância dos resultados do ensaio de impacto Charpy a temperatura de -40°C realizados na região da ZAC, TT 1000/500 e TT 1000/650, os dados apresentados não possuem diferença significativa ao nível de $\alpha = 5\%$ de confiabilidade. Pode-se verificar esta conclusão através do valor-P, o qual é 0,70 e, portanto, maior que $\alpha = 5\%$.

Os corpos de prova que absorveram mais energia na ZAC, a temperatura de ensaio de -40°C, foram os Sem TT, TT 900/650 e TT 900/500. Enquanto que as menores, foram os TT 1000/500 e TT 1000/650.

5.5.4. Ensaios realizados na ZAC a 0°C.

A tabela 5-36 apresenta os resultados do ensaio de impacto Charpy realizados na região da ZAC, suas médias e desvios padrão, à temperatura de 0°C.

Tabela 5-36 Resultado dos Ensaio de Impacto Charpy realizados na ZAC a 0°C

Resultado Impacto Charpy na ZAC a 0°C			
CP	Nº	Resultado (J)	Média (J)
Metal de base	1	292	292 ± 0,00
	2	292	
	3	292	
Sem TT	1	182	202 ±18,77
	2	219	
	3	206	
TT 900/650	1	232	213 ±16,77
	2	204	
	3	202	
TT900/500	1	225	218 ±9,64
	2	222	
	3	207	
TT1000/500	1	196	200 ±15,39
	2	187	
	3	217	
TT1000/650	1	140	145 ±6,11
	2	152	
	3	144	

De acordo com os dados da tabela 5-36, foi construído o gráfico da figura 5-16. A linha vermelha indica a mínima energia 40 Joules absorvida, a qual é requerida pela norma API 5L e a linha verde indica a energia de 292 Joules absorvida pelo metal de base a temperatura de ensaio de 0°C.

O gráfico da figura 5-16 apresenta menor energia absorvida no TT 1000/500. Entretanto, os demais valores são superiores a TT 1000/650, e estão próximos entre si. Para considera-los iguais ou distintos, a análise de variância foi feita. A tabela 5-37 apresenta a estatística descritiva dos dados coletados na tabela 5-36.

Tabela 5-37 Resumo referente a análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados na ZAC a 0°C

RESUMO - ZAC 0°C				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Sem TT	3	607	202,33	352,33
TT 900/650	3	638	212,67	281,33
TT 900/500	3	654	218,00	93,00
TT 1000/500	3	600	200,00	237,00

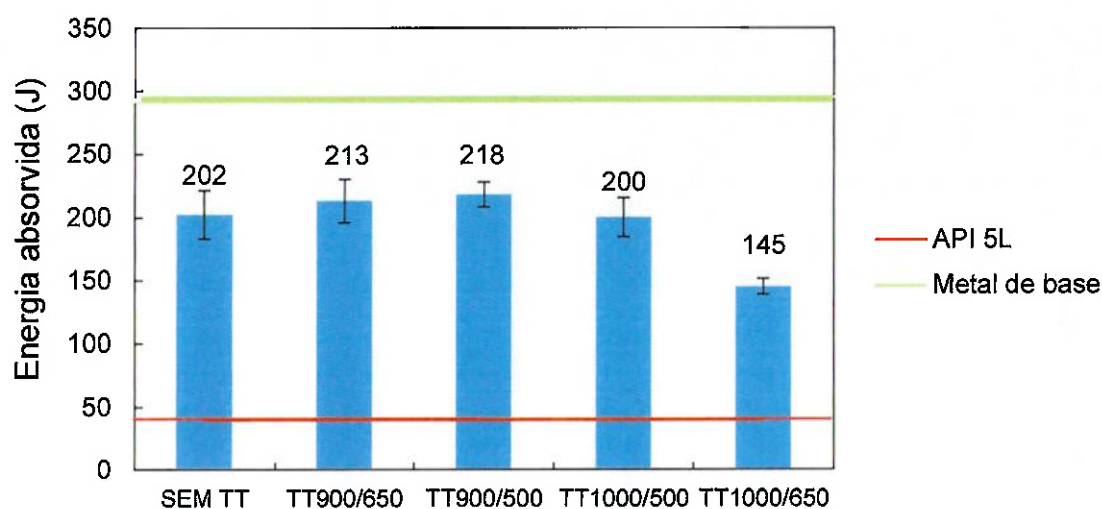


Figura 5-44 Resultado do ensaio Charpy a 0°C na ZAC

A partir dos dados da tabela 5-39, a ANOVA foi realizada e expressa na tabela 5-38.

Tabela 5-38 Análise de variância dos resultados do ensaio Charpy realizados na ZAC a 0°C

ANOVA - ZAC 0°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	652,92	3	217,64	0,90	0,48	4,07
Dentro dos grupos	1927,33	8	240,92			
Total	2580,25	11				

Pode-se observar que F é menor que F crítico ou o valor P é maior que 5% de confiabilidade. Conclui-se então que ao nível de significância $\alpha = 5\%$, os Sem TT, TT 900/650, TT 900/500 e TT 1000/500 são semelhantes entre si.

A figura 5-45 apresenta os resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados no MS a temperaturas de -40°C e 0°C.

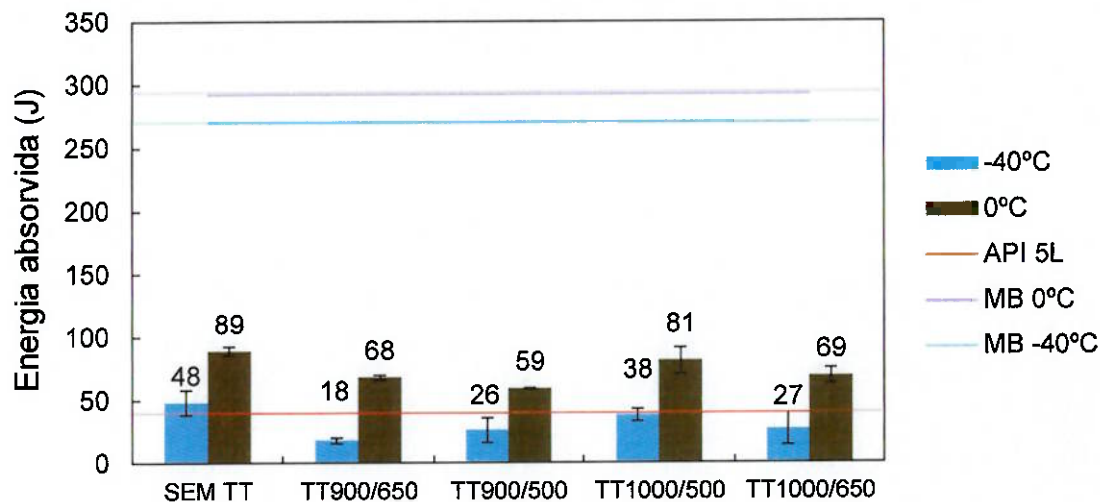


Figura 5-45 Comparação de resultados dos Ensaio Charpy do MS a -40°C e 0°C

De acordo com o gráfico da figura 5-45, o corpo de prova Sem TT apresentou melhor absorção de energia em relação a norma API 5L, representada pela linha em vermelho. Isto pode-se afirmar também quando comparados com as amostras tratadas termicamente. Entretanto, como a norma API 5L especifica a energia absorvida mínima de 40 J a temperatura de 0°C, todos os corpos de prova estão aprovados.

A figura 5-46 apresenta os resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados na ZAC a temperaturas de -40°C e 0°C.

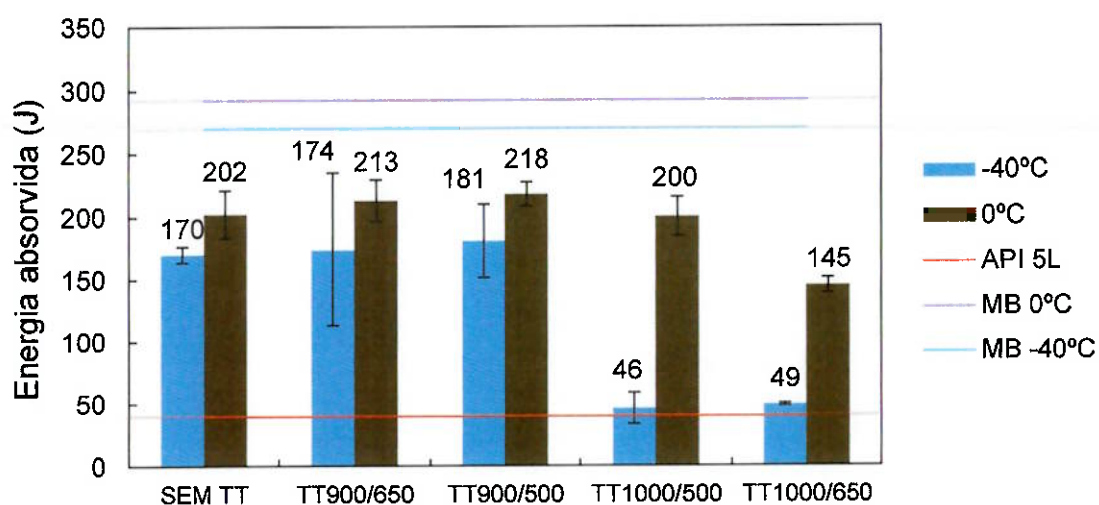


Figura 5-46 Comparação de resultados dos Ensaio Charpy da ZAC a -40°C e 0°C

De acordo com a figura 5-46, os resultados do ensaio de impacto Charpy realizados na ZAC apresentaram resultados satisfatórios em relação da norma API 5L.

A figura 5-47 apresenta um gráfico de comparação dos resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados no MS e ZAC a temperatura de -40°C.

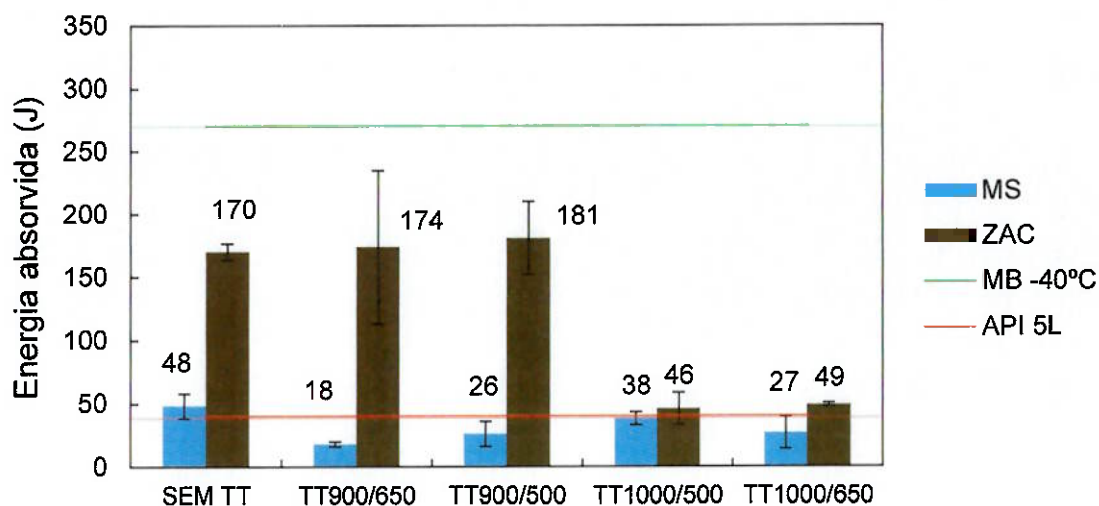


Figura 5-47 Comparação de resultados dos ensaios Charpy do MS e ZAC a -40°C

Os resultados apresentados na figura 5-47 sugerem o corpo de prova Sem TT atingiu o mínimo especificado pela norma API 5L a 0°C.

A figura 5-48 apresenta os resultados do ensaio de impacto Charpy realizados no MS e ZAC a temperatura de 0°C.

De acordo com o gráfico da figura 5-48, todos os corpos de prova estão aprovados pela norma API 5L. A análise estatística dos resultados foram realizadas e discutidas nos itens 5.5.2 e 5.5.4.

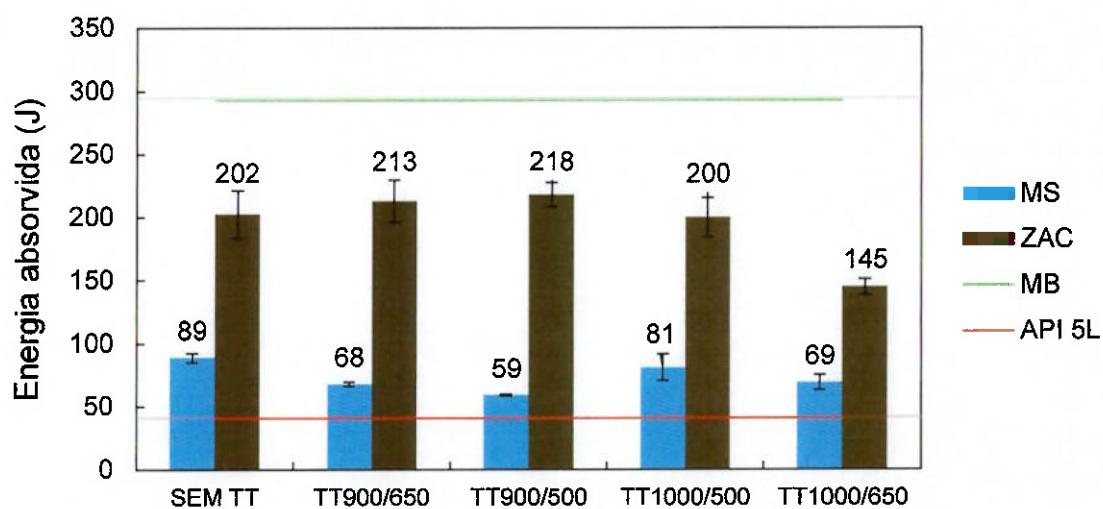


Figura 5-48 Comparação dos resultados dos ensaios Charpy do MS e ZAC a 0°C

A figura 5-49 apresenta todos os resultados de ensaio de impacto Charpy realizados a temperatura de -40°C e 0°C. A linha na cor laranja representa o resultado do MB realizado a 0°C, a linha azul representa o resultado a 0°C e a linha vermelha representa o valor mínimo de 40 J apreciado pela norma API 5L.

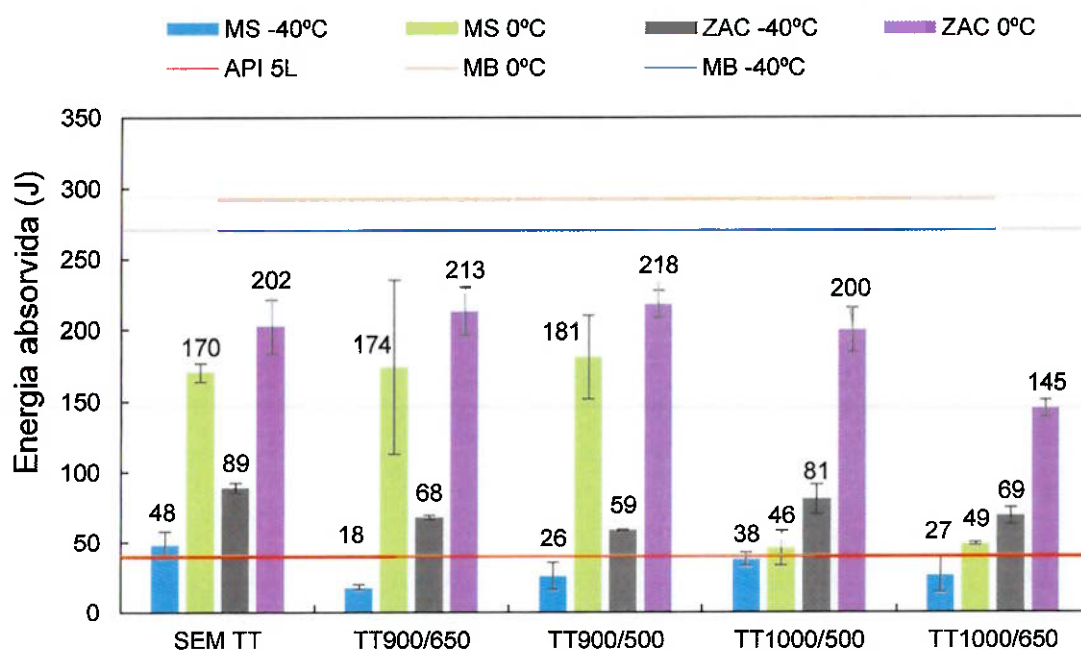


Figura 5-49 Comparação entre os resultados dos ensaios Charpy a 0°C e -40°C e os tratamentos térmicos

De acordo com gráfico da figura 5-49, o corpo de prova Sem TT apresentou melhores absorções de energia em relação aos outros grupos de corpos de prova tratados termicamente. Entretanto, todos estão aprovados pela norma API 5L.

CONCLUSÕES

Tendo em vista os materiais e técnicas empregadas pode-se concluir que:

1. O tratamento térmico de têmpera a 900°C seguido de revenimento a 650°C aumentou em 17% o limite de resistência da junta soldada em relação a condição como soldado.
2. O metal de solda da junta sem tratamento térmico absorveu mais energia a 0°C e -40°C, respectivamente 76,5% e 17% em relação à norma API 5L.
3. A zona afetada pelo calor (ZAC) da junta que não sofreu tratamento térmico de solubilização, têmpera e revenimento, apresentou melhor absorção de energia a 0°C e -40°C, respectivamente 80% e 55% em relação à norma API 5L.
4. A comparação dos perfis de microdureza entre a zona fundida para as todas condições ensaiadas foram iguais entre si. Da mesma maneira, para o metal de base, para todas as condições ensaiadas, não houve variação na microdureza. Por outro lado, todas as zonas afetadas pelo calor, nas condições ensaiadas, apresentaram valores de microdureza diferentes entre si.

SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Estudo do efeito de diferentes tempos de tratamentos térmicos pós soldagem em juntas soldadas do aço API 5L X80

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANP - Agência Nacional do Petróleo, Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustível, 2013.
- [2] ASM International Handbook Committee., Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, 10 ed., vol. 1, 1993, p. 2521.
- [3] ASTM International, ASTM A36/A36M - Standard Specification for Carbon Structural Steel, West Conshohocken, 2014.
- [4] API Specification 5L, Specification for Line Pipe, Forty-fifth ed., American Petroleum Institute, 2012.
- [5] H. G. Hillenbrand, M. Gräf e C. Kalwa, "Development and production of high strength pipeline steels".*EuroPIPE GmbH*.
- [6] ASTM INTERNATIONAL, Standard Specification for Steel Plates for Pressure Vessels, Produced by Thermomechanical Control Process (TMCP), West Conshohocken , Pennsylvania, 2013.
- [7] D. A. Skobir, "High-Strength Low-Alloy (HSLA) Steels," 04 07 2011.
- [8] H. Colpaert, Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, 4ª ed., São Paulo: Blucher, 2008.
- [9] ASM Handbook Committee, ASM Handbook - Heat Treating, vol. 4, ASM INTERNATIONAL, 1991.
- [10] American Welding Society, Welding Handbook - Welding Science and Technology, Ninth Edition ed., vol. 1, C. L. Jenney e A. O'Brien, Eds., Miami, 2001.
- [11] American Welding Society, Welding Handbook - Materials and Applications Part 2, vol. 4, W. R. Oates e A. M. Saitta, Eds., Miami, FL, 1998.
- [12] American Society for Metals, Metals Handbook - Welding, Brazing and Soldering, vol. 6, 1994.
- [13] E. WAINER, S. D. BRANDI e F. D. MELLO, SOLDAGEM, Processos e Metalurgia, São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1993.
- [14] Welding Handbook Committee, Welding Handbook, Ninth Edition ed., vol. Volume 2, A. O'Brien, Ed., Miami, Florida.

- [15] American Welding Society, *Welding Handbook - Welding Processes, Part 1, Ninth Edition ed.*, vol. 2, A. O'Brien, Ed., Miami.
- [16] ESAB, "<http://www.esab.com.br/br/pt/about/>," 2014. [Online]. Available: http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm. [Acesso em 16 Dezembro 2014].
- [17] ASTM International, "ASTM A370," em *Standart Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, 2002.
- [18] M. Iacono, J. C. Soeiro Jr. e S. D. Brandi, "Effect of Subsequent Passes on the Mechanical Properties of the Root Pass of an API 5L X80," em *A part of the 2014 FABTECH Show*, Georgia, 2014.
- [19] J. H. WOODHEAD e S. R. KEOWN, "The history of microalloyed steels," em *Proceedings of an International Conference on HSLA Steels '85*, Beijing, China, 1985.
- [20] P. L. d. O. Costa Neto, *Estatística*, São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.
- [21] G. Z. Batista, R. d. A. Silva, E. Hippert Júnior e I. d. S. Bott, "Determinação dos parâmetros de curvamento a quente e tratamento térmico de tubos API 5L X80," em *Rio Pipeline 2007 - Conference & Exposition*, Rio de Janeiro, 2007.