



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS
GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**EFEITO DAS TÉCNICAS DE
ESMERILHAMENTO E INVERSÃO DE
SENTIDO NAS PROPRIEDADES DE SOLDAS
MULTIPASSES SUBAQUÁTICAS MOLHADAS**

GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO

Belo Horizonte, 14 de novembro de 2017

Gabriel Mendes De Almeida Carvalho

**EFEITO DAS TÉCNICAS DE
ESMERILHAMENTO E INVERSÃO DE
SENTIDO NAS PROPRIEDADES DE SOLDAS
SUBAQUÁTICAS MOLHADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: PhD Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

EFEITO DAS TÉCNICAS DE ESMERILHAMENTO E INVERSÃO DE SENTIDO NAS PROPRIEDADES DE SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS

GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO

Dissertação defendida e aprovada em 14 de novembro de 2017, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**”, na área de concentração de “**Processos de Fabricação**”.

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense – UFMG – Orientador

Prof. Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa – IFMG Campus Betim

Prof. Dr. Paulo José Modenesi – UFMG

Prof. Dr. Ariel Rodríguez Arias – UNIFEI Campus Itabira

Dedicado a todos que buscam a cada dia
se tornarem melhores naquilo
que se propõem a fazer.

AGRADECIMENTOS

Sempre começo meus agradecimentos para o Ser que acredito estar acima das nossas energias aqui na Terra, não importa o nome, Ele nos dá dons e capacidades para alcançar objetivos e ter bons momentos nessa vida.

Obrigado Deus, pela capacidade física, mental e emocional de conquistar mais esse sonho.

Aos meus pais Elvio e Socorro, pelo investimento em mim como filho e cidadão, baseado sempre no amor imensurável deles por mim e meu por eles;

Aos meus irmãos Guilherme e Rafael, pelo companheirismo e por serem os maiores moldadores do meu ser.

Aos meus familiares pelas orações e pela torcida constante, obrigado por serem sempre meu esteio de paz e calma.

Ao meu orientador, Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, por ultrapassar a barreira Orientador-Aluno e por estar ao meu lado em mais uma etapa da minha constante busca de um dia superá-lo.

Ao meu co-orientador, Prof. Ezequiel Caires Pereira Pessoa, por ter me introduzido na soldagem subaquática e por ter me guiado no andamento da pesquisa.

Ao Prof. Paulo José Modenesi pelos ensinamentos dentro de sala e pela disponibilidade fora dela.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho diário no Laboratório (LRSS) pelo incentivo e pela paciência. Agradecimento especial à Carol, Nilo, Gedael, Frank, Mateusão, Mateus Cip, Fagner, Prof. Ariel, Carolzinha e Bruno, Camila, Café, Prof. Claudio, Danielle, Diego, Diogo, Fernando, Filipe, Henrique, José Roberto, Leandro bombeiro, Luana, Luciano, Luiz, Marcelo, Marco, Moara, Renata, Sheron, Tarcísio, a caminhada não seria a mesma sem vocês.

Ao Andrejito e Miguelito pelas “peleas” semanais, pelo companheirismo dentro e fora de casa e pelas aulas de espanhol.

Aos meus companheiros de artigos, Arthur, Bruno e Rafael, que o trabalho continue.

Agradecimento à UFMG pela estrutura e financiamento, agradecimento em especial à Marina e Rayanne, por não pouparem esforços para o bom andamento da pós-graduação.

À CAPES e à PETROBRAS pelo financiamento.

Meus sinceros agradecimentos.

“Nunca deixe que lhe diguem
Que não vale acreditar num sonho que se tem,
Que seus planos nunca vão dar certo
Ou que você nunca vai ser alguém”.
(Renato Russo)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS E QUADROS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
NOMECLATURA	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Soldagem Subaquática.....	22
2.2 Processos de Soldagem Subaquática Molhada	23
2.3 Soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos	24
2.4 Principais dificuldades da soldagem molhada	25
2.4.1 Elevada dureza da ZTA.....	26
2.4.2 Trincas na região de soldagem	27
2.4.3 Porosidades.....	Erro! Indicador não definido.
2.4.4 Grãos colunares	31
2.5 Sub-regiões da região de soldagem com passe único	33
2.6 Sub-regiões da região de soldagem multipasses	35
2.7 Técnicas de reparo por soldagem sem TTPS	36
2.7.1 Técnica da meia camada	36
2.7.2 Técnica da dupla camada	37
2.8 Passe de revenimento.....	39
2.8.1 Aplicação do passe de revenimento	39
2.8.2 A martensita e o revenimento.....	40
2.9 - Alguns dos elementos necessários para desenvolver a técnica da dupla camada	41
2.10 Aço ABNT 1045	42
2.10.1 Aplicações e propriedades mecânicas do aço ABNT 1045.....	42
2.10.2 Temperabilidade do aço ABNT 1045	43
2.11 Ensaio de Dureza	46
3. METODOLOGIA	47
3.1 Materiais	47
3.1.1 Metal base	47
3.1.2 Preparação do Chanfro	48
3.1.3 Eletrodos.....	50
3.2 Equipamentos de soldagem	50
3.2.1 Tanque hiperbárico.....	50
3.2.2 Fonte de soldagem.....	51
3.2.3 Sistema de soldagem por gravidade	52
3.3 Cálculo da energia de soldagem	53
3.3.1 Sistema de aquisição de corrente e tensão	53
3.4 Método de desbaste (esmerilhamento)	55
3.5 Método da inversão de sentido	55
3.6 Corte da seção transversal por passe.....	56
3.5.1 Histórico da junta	61
3.6.1 Posicionador.....	62

3.7 Ensaio de microdureza Vickers	62
3.8 Metalografia.....	64
3.8.1 Macrografia feitas por montagens de micrografias.....	65
3.8.2 Configurações de Soldagem utilizadas	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 Parâmetros de Soldagem.....	68
4.2 Cálculo da energia de Soldagem do processo.....	69
4.4 Resultados para o ensaio de dureza	72
4.4.1 Sem Inversão / Sem Esmerilhamento.....	74
4.4.4 Com Inversão / Com Esmerilhamento	78
4.5 “Evolução da dureza”	81
4.6 Efeito do Revenimento	91
5. CONCLUSÕES.....	94
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Classificação das técnicas de soldagem subaquática.	22
FIGURA 2.2 - Efeito da água na soldagem molhada.	26
FIGURA 2.3 Fluxo esquemático de hidrogênio na soldagem.	30
FIGURA 2.4 - Esquema de refusão de poros.	Erro! Indicador não definido.
FIGURA 2.5- Comparação entre as formas das crateras de soldas molhadas e secas.	32
FIGURA 2.6- Comparação entre a taxa de crescimento das soldas molhadas e soldas secas.	32
FIGURA 2.7- Comparação entre taxa de crescimento relativo entre soldas molhadas e secas para um quarto de cratera.	33
FIGURA 2.8 - Esquema de uma soldagem com passe único com indicação das subdivisões da ZTA.	34
FIGURA 2.9- Diagrama esquemático de uma soldagem multipasses e o efeito do revenimento.	36
FIGURA 2.10- Esquema da técnica de meia camada.	37
FIGURA 2.11- Esquema das sub-regiões da ZTA em uma soldagem multipasses.	38
FIGURA 2.12- Queda relativa de dureza em função da distância entre a ZL.	40
FIGURA 2.13- Influência do teor de carbono sobre a dureza da martensita, da perlita e de uma estrutura de carbonetos esferoidizados.	41
FIGURA 2.14- Diagrama de Graville.	44
FIGURA 2.15- Diagramas TRC durante tratamento térmico (linhas pontilhadas) e durante soldagem (linhas cheias).	45
FIGURA 2.16 - Medição de impressão na dureza vickers.	46
FIGURA 3.1 - Aço SAE 1045 utilizado, aumento de 200X.	48
FIGURA 3.2 Chanfro de bordas paralelas utilizado neste trabalho.	49
FIGURA 3.3 - Chanfro de bordas paralelas utilizado neste trabalho.	49
FIGURA 3.4 - Tanque hiperbárico utilizado para realizar soldas molhadas e simular profundidade.	51
FIGURA 3.5 - Fonte de soldagem IMC Hiper-1 utilizada para soldagem subaquática dos corpos de prova.	52
FIGURA 3.6- Esquema do dispositivo mecanizado de soldagem por gravidade utilizado neste trabalho.	52
FIGURA 3.7- Sistema SAP V4 utilizado para aquisição da corrente e tensão do processo.	54
FIGURA 3.8- Interface do SAP V4 - Sistema de aquisição de sinais utilizado.	54
FIGURA 3.9- Esquema da seção transversal de um cordão depositado e a seção do mesmo cordão depois de sofrer o processo de esmerilhamento do reforço.	55
FIGURA 3.11- Método da inversão do sentido de soldagem.	56
FIGURA 3.12- Corpo de prova cortado com destaque para a amostra retirada.	57
FIGURA 3.13 - Retirada da segunda seção transversal (D) da junta soldada. Nesse momento a seção possui 2 cordões depositados.	58
FIGURA 3.14- Esquema do passo-a-passo na soldagem do chanfro quando utilizado o processo de esmerilhamento.	59
FIGURA 3.15- Esquema do passo-a-passo na soldagem do chanfro quando utilizado o processo de inversão do sentido de soldagem.	60
FIGURA 3.16- O mesmo chanfro soldado com processo de inversão de sentido. Na figura é apresentado o mesmo corpo de prova em cordões subsequentes (A1) e (A2).	61
FIGURA 3.17 - Esquema das amostras das seções transversais dos corpos de prova.	61
FIGURA 3.18- Posicionador dedicado para o corpo de prova utilizado neste trabalho. Garante o bom posicionamento e evita abertura entre as partes a serem soldadas.	62

FIGURA 3.19- Microidentador digital usado nos ensaios.	63
FIGURA 3.20– Esquema de um chanfro preenchido com 5 passes, com destaque para as regiões onde foram feitas as medidas de microdureza.	63
FIGURA 3.21 - Microscópio Olympus SZ-CTV e Olympus BX60M utilizado para realização das micrografias e macrografias.	64
FIGURA 3.22 - Imagens de um mesmo corpo de prova. Uma feita por câmera de macrografia convencional, a outra feita por junção de diversas micrografias sequenciadas.....	65
FIGURA 3.23 - Exemplificação de como a macrografia é montada a partir de micrografias.	66
FIGURA 4.1 - Cordões realizados para escolha dos parâmetros. (A)65°/160A (B)65°/200A; (C)60°/160A; (D)60°/200A; (E)55°/160A; (F)55°/200A.....	69
FIGURA 4.2 – Oscilogramas de Corrente d Soldagem e Tensão de soldagem. Parâmetros: 60° e 200A. Linha pontilhada mostrando a tendência da curva.....	70
FIGURA 4.3 - Macrografias CP 1 e CP 2 - Configuração: Sem inversão / Sem esmerilhamento.....	71
FIGURA 4.4 - Macrografias CP 3 e CP 4 - Configuração: Com inversão / Sem esmerilhamento.....	71
FIGURA 4.5 - Macrografias CP 5 e CP 6 - Configuração: Sem inversão / Com esmerilhamento.....	72
FIGURA 4.6 - Macrografias CP 7 e CP 8 - Configuração: Com inversão / Com esmerilhamento.....	72
FIGURA 4.7- Posições das identações seguindo a metodologia. Em (A) tem-se esquema do chanfro soldado com as posições das identações; Em (B) é possível visualizar as identações feitas no corpo de prova (CP1) soldado.....	73
FIGURA 4.8 - . Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP1 soldado sem inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	74
FIGURA 4.9 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP2 soldado sem inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	74
FIGURA 4.10 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP3 soldado com inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	76
FIGURA 4.11 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP4 soldado com inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	76
FIGURA 4.12 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP5 soldado sem inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	77
FIGURA 4.13 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP6 soldado sem inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	78
FIGURA 4.14 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP 7 soldado com inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	79
FIGURA 4.15 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP 8 soldado com inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.	80
FIGURA 4.16 - Esquema da deposição do 1° passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.....	82

FIGURA 4.17- Esquema da deposição do 2º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.....	82
FIGURA 4.18- Esquema da deposição do 3º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.....	83
FIGURA 4.19- Esquema da deposição do 4º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.....	83
FIGURA 4.20- Esquema da deposição do 5º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.....	84
FIGURA 4.21 - Macro do 1º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.	85
FIGURA 4.22- Macro do 2º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.	85
FIGURA 4.23- Macro do 3º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.	86
FIGURA 4.24- Macro do 4º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.	86
FIGURA 4.25- Macro do 5º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.	87
FIGURA 4.26- As setas negras apontam as regiões que, em passes anteriores, apresentam elevada dureza e que, mesmo após os passes subsequentes, permaneceram com dureza elevada até o último passe.	88
FIGURA 4.27- As setas negras apontam as regiões que, em passes anteriores, apresentam elevada dureza e que, mesmo após os passes subsequentes, permaneceram com dureza elevada até o último passe.	90
FIGURA 4.28- À esquerda macrografia do CP 1 com a região em vermelha em destaque. Em destaque a região superficial e interna da ZTA, evidenciando a diferença de dureza entre as identificações.	91
FIGURA 4.29- À esquerda macrografia do CP 4 com a região em vermelha em destaque. Em destaque a região interna da ZTA, a diferença de dureza entre as identificações evidencia a dependência do grau de revenimento nessa propriedade.....	92

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.2- Composição química do aço ABNT 1045 (% em massa).	42
TABELA 2.2- Propriedades Mecânicas do aço ABNT 1045.....	42
TABELA 2.3- Microestrutura do aço ABNT 1045 devido a soldagem e ao tratamento térmico	45
TABELA 3.1 - Composição química do aço ABNT 1045 utilizado (% em massa).	47
TABELA 3.2- Nomeclatura para os corpos de prova de acordo com a utilização ou não das técnicas estudadas.....	67
TABELA 4.1 - Valores de corrente e velocidades de soldagem estudados antes da seleção da parametrização final.	68
TABELA 4.2 - Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem dos chanfros.....	70
TABELA 4.3 - Regiões internas com dureza acima de 325HV para os CP 1 e CP 2.....	75
TABELA 4.4 - Regiões internas com dureza acima de 325HV para os CP 3 e CP 4.....	77
TABELA 4.5 - Para os CPs 5 e 6 não houve região interna com dureza acima de 325HV.....	78
TABELA 4.6 - Para os CPs 7 e 8 não houve região interna com dureza acima de 325HV.....	80
TABELA 4.7 - Resultados da presença ou não de regiões excessivamente duras no interior dos chanfros de acordo com as técnicas utilizadas.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCC	Cúbico De Corpo Centrado
CE	Carbono Equivalente
CP	Corpo De Prova
HAZ	Heat-Affected Zone
IIW	International Institute of Welding
LRSS	Laboratório De Robótica Soldagem E Simulação
MB	Metal De Base
MS	Metal De Solda
N/A	Não Se Aplica
NBR	Norma Brasileira
PPGMEC	Programa De Pós Graduação Em Engenharia Mecânica
PWHT	Post Weld Heat Treatment
SAE	Society of Automotive Engineers
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
SMER	Soldagem Molhada Com Eletrodo Revestido
TRC	Transformação por Resfriamento Contínuo
TTPS	Tratamento Térmico Pós Soldagem
UFMG	Universidade Federal De Minas Gerais
UWW	Underwater Wet Welding
ZAC	Zona Afetada Pelo Calor
ZF	Zona Fundida
ZL	Zona De Ligação
ZTA	Zona Térmicamente Afetada
ZTA-GF	Zona Termicamente Afetada De Grãos Finos
ZTA-GG	Zona Termicamente Afetada De Grãos Grosseiros
ZTA-IC	Zona Termicamente Afetada Intercrítica
ZTA-SC	Zona Termicamente Afetada Subcrítica

NOMECLATURA

d	Diâmetro do eletrodo [mm]
I	Corrente de Soldagem [A]
I_m	Corrente média [A]
I_{cc}	Corrente de curto circuito [A]
T_s	Tempo de Soldagem [s]
U	Tensão [V]
U_m	Tensão média [V]
V_m	Velocidade de Soldagem [mm/s]

RESUMO

As estruturas utilizadas no segmento offshore, como navios e plataformas, são projetadas para resistirem aos mais diversos esforços, mantendo-se íntegras e sobretudo seguras. Para atenderem essas necessidades por mais tempo é preciso que a manutenção realizada sobre as mesmas mantenha as propriedades mecânicas exigidas. Por motivos econômicos, a manutenção destas estruturas é quase sempre realizada offshore. A soldagem molhada com eletrodo revestido (SMER) devido ao seu baixo custo em relação à outros processos, sua versatilidade em trabalho e por já alcançar resultados de boa qualidade tem sido vastamente utilizada. Apesar das melhorias conseguidas nos últimos anos, principalmente sobre a qualidade do metal depositado, tem-se ainda problemas na manutenção das propriedades mecânicas em valores adequados da “região de soldagem”. Um dos principais problemas é a perda de ductilidade de regiões aquecidas adjacentes à solda ou a zona termicamente afetada (ZTA). Devido ao rápido resfriamento inerente do processo molhado, uma microestrutura de alta dureza e baixa tenacidade é gerada. Uma alternativa possível para melhoria da tenacidade nestas regiões é a aplicação de um tratamento térmico pós soldagem (TTPS) como já estudado em processos fora d’água. Porém a aplicação de um TTPS por vezes se torna inviável e de difícil implementação no ambiente subaquático. Uma alternativa de alcançar melhorias nas propriedades das soldas multipasses, pode ser a utilização do próprio calor proveniente de passes subsequentes, promovendo o revenimento de regiões endurecidas e assim, atingindo níveis adequados de dureza.

Neste trabalho estudou-se o efeito de duas técnicas e combinações delas durante a soldagem subaquática sem TTPS, para controlar a dureza da ZTA de soldas molhadas multipasses. Uma das técnicas utilizadas foi o esmerilhamento para desbaste do cordão à cada passe de solda depositado, deixando sempre 1mm de reforço. A outra técnica utilizada foi a inversão no sentido de soldagem à cada camada de deposição. Para o estudo foi desenvolvido um chanfro com abertura de valor próximo ao diâmetro do eletrodo utilizado e com as paredes paralelas, para que assim a deposição ficasse mais comportada, refletindo também num melhor posicionamento da ZTA a ser avaliada. O material escolhido foi o aço SAE 1045, por ser temperável em água, apresentando regiões de elevada dureza quando resfriado rapidamente. O eletrodo utilizado foi o E 6013 devidamente envernizado para soldagem subaquática. Todas as soldas foram realizadas em camera hiperbária adaptada para simular soldas em profundidades. As soldas foram realizadas a pressão equivalente a 10 metros de profundidade.

Os resultados mostraram que quando nenhuma técnica é aplicada, pontos internos da ZTA apresentam regiões de elevada dureza em que o calor de passes subsequentes não é suficiente para promover um revenimento adequado do material. Porém quando utiliza-se a técnica do esmerilhamento, retirando parte do reforço, o calor é melhor aproveitado e o revenimento alcançado promove amaciamento de toda extensão da ZTA, deixando valores de dureza aceitáveis e abaixo dos limites estabelecidos por norma. Por outro lado, nenhuma melhoria foi notada quando utiliza-se a técnica de inversão no sentido de soldagem.

Palavras-chave: Soldagem subaquática; UWW; Soldagem Offshore.

ABSTRACT

The structures used in the offshore segment, such as ships and platforms, are designed to withstand the most diverse loads, remaining intact and above all safe. In order to meet these needs for longer, it is necessary that the maintenance performed on them maintain the mechanical properties required. For economic reasons, the maintenance of these structures is almost always carried out offshore. Wet Welding with Coated Electrode (UWW-SMAW) due to its low cost in relation to other processes, its versatility in work and already achieving good quality results has been widely used. In spite of the improvements achieved in recent years, mainly on the quality of the deposited metal, there are still problems in maintaining the mechanical properties in the proper values of the "welding region". One of the main problems is the loss of ductility of heated regions adjacent to the weld or the heat-affected zone (HAZ). Due to the rapid cooling inherent in the wet process, a microstructure of high hardness and low toughness is generated. A possible alternative for improving the toughness in these regions is the application of a Post Weld Heat Treatment (PWHT) as already studied in processes out of water, however the application of a PWHT sometimes becomes impractical and difficult to implement in the underwater environment. One alternative of achieving improvements in multipass weld properties may be the use of the heat itself from subsequent passes, promoting the tempering of hardened regions and thus, reaching suitable levels of hardness.

In this work is studied the effect of two techniques and combinations of them during underwater welding without PWHT, to control the hardness of HAZ wet welds multipasses. One of the techniques used was grinding the weld after each weld pass deposited, always leaving 1mm of reinforcement. The other technique used was the inversion in the sense of welding to each deposition layer. For the study a bevel was developed with a value close to the diameter of the electrode used and with the parallel walls, so that the deposition was more behaved, also reflecting a better positioning of the HAZ to be evaluated. The material chosen was SAE 1045 steel, because it can be hardened, presenting regions of high hardness when cooled rapidly. The electrode used was the E 6013 varnished for underwater welding. All welds were produced in a hyperbaric chamber adapted to simulate welds at depths. The welds were made at a pressure equivalent to 10 meters deep.

The results showed that when no technique is applied, internal HAZ points present regions of high hardness where heat from subsequent passes is not sufficient to promote adequate tempering of the material. However when using the grinding technique, removing part

of the reinforcement, the heat is better utilized and the tempering achieved promotes softening of all extension of the ZTA, leaving values of hardness acceptable and below the limits established by norm. On the other hand, no improvement has been noticed when using the inversion technique in the welding direction.

Keywords: Underwater welding; UWW; Wet Welding; Offshore.

1. INTRODUÇÃO

A união de metais por soldagem pode apresentar problemas de origem metalúrgica em função da composição do material e do ciclo térmico imposto no momento da soldagem. Pode-se citar como fenômenos inerentes ao processo: crescimento de grão, aparecimento de estruturas frágeis, fissurações, dentre outros (CHOPRA et al. 2006), que podem originar falhas.

Muitas dificuldades de origem metalúrgica são encontradas na soldagem de aços temperáveis e de maior espessura, os códigos de fabricação de estruturas (ASME, 1995) recomenda-se realizar, para esses aços, tratamento térmico pós-soldagem (TTPS), usualmente em temperaturas acima de 600°C. As principais razões para especificar os TTPS são: melhorar a estrutura metalúrgica e propriedades das juntas soldadas, reduzir os riscos de falha por fratura frágil, trincas por corrosão sob tensão, produzir alívio das tensões residuais e melhorar o desempenho sob fadiga (AGUIAR, 2001).

Em muitos casos é inviável a aplicação de um TTPS, principalmente quando se precisa reparar uma estrutura já montada, um componente de grande porte ou realizar o procedimento em uma região de difícil acesso. Um dos casos mais complexos para aplicação de um TTPS é na soldagem de componentes subaquáticos sendo esse o escopo deste trabalho.

As soldas subaquáticas molhadas são classificadas segundo a norma AWS D3.6 (AWS, 2010) em soldas classe A e B, vários procedimentos classe B foram aprovados no Brasil em soldas molhadas nas últimas décadas (PESSOA, et al., 2013). Tentativas de aprovação de procedimento de soldagem classe A falharam em medições de dureza na ZTA cujo limite é estabelecido, pela norma, em 325HV para aços estruturais (AWS, 2010).

As altas durezas encontradas na ZTA de soldas molhadas são resultado do uso de aços com alta temperabilidade, normalmente encontrados em estruturas de plataformas de petróleo, em combinação com as altas taxas de resfriamento (BRACARENSE, et al., 2008) encontradas em soldagem molhada.

A literatura relata a aplicação de alguns procedimentos que objetivam a redução da dureza na ZTA de soldas molhadas como aplicação de tratamento térmico pós soldagem com o uso de chama a gás ou oxi-hídrica (IBARRA & SZELAGOWSKI, 1992.) e outros procedimentos que não se enquadram em TTPS como: aumento do aporte térmico (PESSOA, et al., 2013), aplicação do passe de revenimento (OLSEN, 1982), aplicação de laser (FUKUDA,

et al., 2009) e controle taxa de resfriamento (ZHANG, DAI, FENG, & HU, 2015); (TSAI & MASUBUCHI, 1979.); (HASUI & SUGA, 1980.)

Todas essas técnicas apresentam grandes dificuldades de aplicação no campo em condições marítimas comuns na costa brasileira, seja da ordem de controle, posicionamento ou parametrização. Essas dificuldades geram falta de repetibilidade e garantia do controle efetivo da dureza de ZTAs de soldas molhadas.

Portanto, existem fortes motivações técnicas e econômicas que explicam o grande esforço internacional empreendido desde o final da década de 80 no sentido de desenvolver procedimentos de reparo sem TTPS, que garantam propriedades mecânicas aceitáveis e boa performance estrutural.

Muitas são as técnicas que utilizam a própria energia proveniente do processo de soldagem multipasses para melhoria das propriedades mecânicas das uniões feitas por soldagem, pode-se citar principalmente: a técnica da meia camada, técnica da camada alternada, técnica da camada consistente e a técnica de deposição controlada (KÜCHLER, 2009).

Apesar do avanço das técnicas, ainda existem dificuldades na escolha dos critérios adequados para a realização da soldagem e falta de dados sobre o desempenho em serviço dos componentes reparados (SPERKO,2005). Maiores ainda são as dificuldades quando o processo de soldagem é subaquático e na presença de água.

Com base nas informações apresentadas, o objetivo deste trabalho é relatar e discutir a influência da aplicação de técnicas simples sem tratamento térmico posterior, que visam a melhoria das propriedades mecânicas de juntas soldadas na presença de água, principalmente no controle da dureza excessiva. Nesse trabalho serão estudadas as técnicas de **“esmerilhamento do reforço à cada passe”** e **“inversão no sentido de soldagem”** ambos para soldas multipasses.

Com a técnica de esmerilhamento espera-se um melhor aproveitamento dos ciclos térmicos impostos na soldagem multipasses visando o amaciamento da ZTA. Com a técnica de inversão de sentido, tem-se uma mudança nas direções de crescimento dos grãos da zona fundida, podendo melhorar propriedades do cordão de solda.

As soldas foram realizadas em um tanque hiperbárico, simulando as condições encontradas em campo, como a presença d'água e a pressão exercida pelo meio. Foram utilizados um aço médio carbono SAE 1045 e o processo de eletrodo revestido (SMAW), afim de estudar principalmente a influência dos procedimentos propostos nas propriedades da ZTA.

Como objetivos específicos, buscou-se neste trabalho:

Fomentar pesquisas que melhorem as propriedades de componentes soldados em processos de soldagem subaquáticos e propor novos estudos, principalmente sobre o fluxo de calor na soldagem na presença de água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem Subaquática

Até o surgimento de extração de petróleo no mar, a soldagem subaquática era somente usada em reparos de caráter emergencial em cascos de navio e estruturas portuárias submersas. O drástico aumento no preço do barril de petróleo, ocorrido em 1973, fez com que a extração do petróleo, que se concentrava quase que totalmente em terra, se expandisse rapidamente para a costa marítima. Consequentemente, a necessidade de reparos de solda nessas estruturas estimulou a realização de muitos trabalhos de pesquisa nessa área. (FILHO *et al.*, 2004).

Hoje no mundo existem muitas plataformas em final de vida, mas, como são importantes econômica ou estrategicamente para as empresas, não podem ser removidas. Assim, muitas delas, sofrem operações de melhoramentos e reforço.

Para reparação de danos ou reforço em plataformas é preciso aplicar técnicas de reparo confiáveis, as quais pode-se destacar: braçadeiras mecânicas, soldagem a seco em câmeras hiperbáricas e soldagem molhada.

A soldagem subaquática pode ser subdividida em soldagem úmida, soldagem em cavidade local e soldagem seca, conforme esquematizado na Figura 2.1 (CHRISTENSEN, 1983). Existem cinco tipos de técnicas em uso: soldagem em 1atm, soldagem em habitat, soldagem em câmara seca, soldagem em ponto seco e soldagem molhada (AWS, 2011).

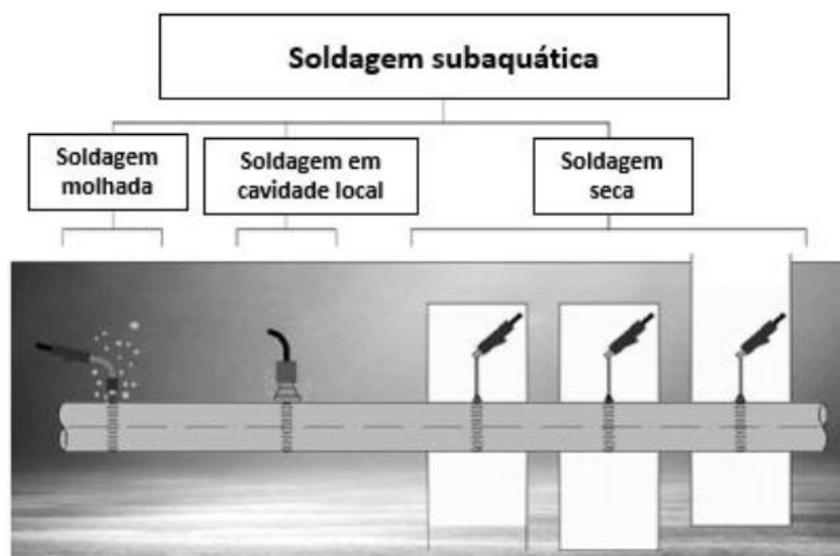


FIGURA 2.1 - Classificação das técnicas de soldagem subaquática.

FONTE – LABANOWSKI *et al.*, 2008, p.12.

As vantagens da soldagem subaquática seca reside no fato de que o ambiente seco promove melhorias na estabilidade do arco elétrico, reduz os problemas com hidrogênio no metal de solda, resulta em menor taxa de têmpera do metal de base, permite a restauração das propriedades da solda de ductilidade e tenacidade, que são os principais problemas das soldas produzidas em soldagem subaquática molhada. Como desvantagem, a soldagem seca exige um alto valor de investimento na câmara e aparatos para a retirada da água do ambiente, que em soldagem molhada não é necessário (AWS, 2011).

2.2 Processos de Soldagem Subaquática Molhada

Soldagem Molhada é um método no qual a junta a ser soldada está em contato direto com a água. Segundo SILVA (2013), a soldagem molhada é um processo bastante complexo, pois é realizada diretamente em contato com o meio aquoso. Devido a esse fato surgem problemas que afetam as propriedades mecânicas do metal de solda tais como a elevada taxa de resfriamento e a dissociação da água (em H⁺ e OH⁻) devido ao calor gerado pelo arco elétrico. Soldagem molhada é a técnica mais simples, no qual a junta e o mergulhador estão em contato com a água do ambiente sem nenhuma barreira física entre a água e o arco elétrico (AWS, 2011; SILVA, 1983).

A soldagem molhada se desenvolveu a partir de 1940, quando houve o desenvolvimento de consumíveis resistentes a umidade (KEATS, 2005). Esta técnica é usada, principalmente, para reparos temporários de navios (GARASIC et al., 2010), plataformas de petróleo e oleodutos e em casos de emergências e acidentes (ANAND e KHAJURIA, 2013).

O material mais soldado em condições molhadas é o aço (CARY e HELZER, 2005). Dentre os processos de soldagem, o mais empregado é o SMAW, seguido por FCAW (AWS, 2011), mas também pode ser utilizado soldagem por fricção (GRANJON, 1983). As vantagens que justificam a preferência pelo processo SMAW são a simplicidade do equipamento (fonte de energia, cabos, porta-eletrodo e eletrodos impermeabilizados), baixo custo, mobilidade, fácil uso e rapidez de reparo que permitem sua aplicação em locais de clima instável (WERNICKE, 1998).

A execução de reparos de soldagem subaquática molhada em estruturas de plataformas de petróleo que operam em profundidade elevada é ainda bastante restrita, visto que esses materiais possuem alta resistência mecânica ($\sigma_e > 350\text{MPa}$) e, conseqüentemente elevado

carbono equivalente, o que contribui significativamente para a ocorrência de fissuração pelo hidrogênio (FILHO *et al.*, 2004).

Pesquisas vêm sendo feitas com o objetivo de resolver os problemas inerentes da soldagem molhada, porosidade excessiva, propriedades mecânicas inferiores as soldas ao ar e grande quantidade de hidrogênio no metal de solda. Devido a essa evolução, a soldagem molhada tem sido aplicada com sucesso no reparo de plataformas no Golfo do México (no exterior, numerosas intervenções para reparos estruturais por soldagem subaquática molhada em plataformas foram relatadas, sendo notáveis aqueles realizados em plataformas fixas do Golfo do México (PESSOA, 2007).

2.3 Soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos

A soldagem molhada com eletrodo revestido tem sua principal aplicação em reparos de estruturas, utilizadas principalmente na indústria naval, de exploração de gás e petróleo e, mais recentemente, em alguns componentes de usinas hidrelétricas. As plataformas petrolíferas modernas são projetadas para suportar até 100 anos de exposição a esforços provocados por tempestades ou furacões.

A técnica de soldagem por eletrodos revestidos traz o inconveniente de introduzir defeitos e/ou descontinuidades no metal de base. Segundo ANDRADE (2010) a porosidade é um defeito comum em soldagem subaquática molhada. Pesquisas realizadas em soldas atmosféricas e molhadas comprovam que a elevada taxa de resfriamento leva a formação de trincas na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de solda (BRACARENSE *et al.*, 2010).

De um modo geral a indústria naval considera a soldagem molhada com eletrodo revestido como uma técnica de reparo usada em emergências. Para isso utiliza-se de eletrodos comerciais, como por exemplo o AWS E6013 ou eletrodos com alterações na composição do revestimento de base rutílica. (PESSOA, 2007).

Esta técnica oferece melhores resultados quando aplicada em águas rasas (profundidades de até 20m), correspondendo às profundidades máximas dos componentes estruturais das unidades flutuantes quando em operação. Porém, é necessário que a confiabilidade destes reparos seja reconhecida tanto pelas operadoras quanto pelas sociedades classificadoras envolvidas para avaliações de integridade estrutural, sob a ótica da qualidade para uso específico, sejam aceitas.

Em soldagem subaquática usualmente referencia-se o código AWS D3.6M:2010 “Underwater Welding Code” (AWS, 2010), onde as soldas estruturais são classificadas em duas categorias. Para as soldas classe A estão presentes requisitos de tenacidade, resistência, ductilidade, dureza e dobramento em níveis semelhantes aos exigidos pelos principais códigos de engenharia em soldagem atmosférica que raramente são alcançadas em soldagem molhada. Para as soldas classe B, conceituadas como soldas com qualidade estrutural limitada, tanto os testes aplicados na qualificação de procedimentos quanto os critérios de aceitação são menos rigorosos que os referentes ao tipo A.

Historicamente, os procedimentos de soldagem molhada são certificados (qualificados) como classe B de acordo com a norma internacional de soldagem subaquática AWS D3.6M. Outro obstáculo que dificulta a obtenção de classe A, e não está diretamente relacionado com o tipo de eletrodo, é a elevada dureza na zona afetada pelo calor (ZTA).

2.4 Principais dificuldades da soldagem molhada

LIU (1999) afirma que a qualidade de soldas molhadas é inferior as obtidas em soldas secas devido a vários fatores, tais quais a perda de elementos de liga do metal de solda, aumento do teor de hidrogênio e oxigênio no metal de solda o que aumenta a suscetibilidade ao surgimento de poros e trincas.

A água é a principal responsável pela má qualidade da solda em soldagem molhada, em relação as soldas produzidas ao ar, gerando porosidade elevada e baixa tenacidade (ISIKLAR e GIRGIN, 2011). A taxa de resfriamento na água é maior do que as obtidas em soldagem seca. No ambiente molhado a taxa de resfriamento varia entre 800 °C/s e 500°C/s, já no ambiente seco é comum uma taxa entre 415 °C/s e 55 °C/s. (CHRISTENSEN, 1983).

Em condições subaquáticas molhada o resfriamento rápido do metal de solda é consequência das perdas de calor na superfície da solda atrás do arco elétrico.

Devido a esses fatores os principais problemas associados com a soldagem molhada são de ocorrência físicas e descontinuidades metalúrgicas como descritos a seguir (LIU et al, 1994):

No metal de solda:

- Perda de elementos de liga,
- Porosidade,
- Trincamento por solidificação.
- Trincamento por hidrogênio,

Na ZTA:

- Dureza excessiva
- Trincamento por hidrogênio

É apresentado na Figura 2.2 um esquema dos principais problemas que se tem na soldagem subaquática como relatado acima.

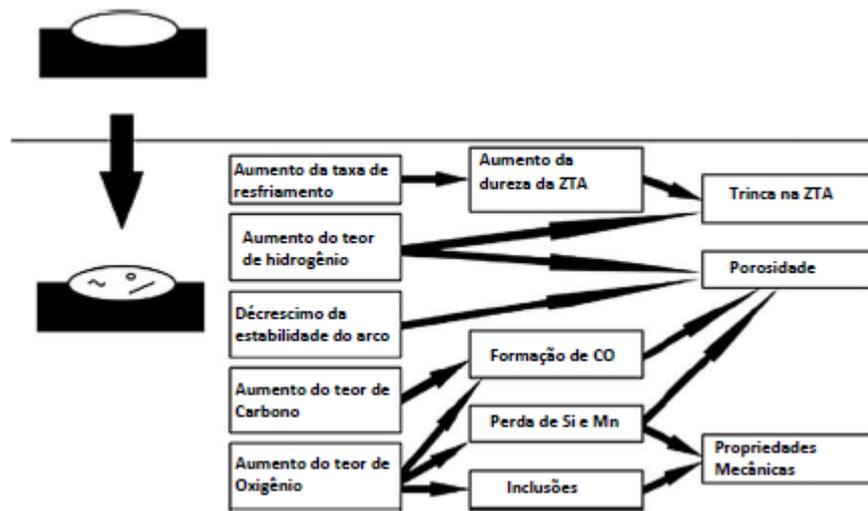


FIGURA 2.2 - Efeito da água na soldagem molhada.

FONTE – Modificado, LIU, 1994.

2.4.1 Elevada dureza da ZTA

As altas durezas encontradas na ZTA de soldas molhadas são resultado do uso de aços com alta temperabilidade, normalmente encontrados em estruturas de plataformas de petróleo, em combinação com as altas taxas de resfriamento (BRACARENSE, 2008) encontradas em soldagem molhada. A taxa de resfriamento, por sua vez, depende do aporte térmico adotado.

Em aços estruturais AH-36 utilizadas nas tentativas de aprovação classe A, foram medidos valores máximos de dureza na ZTA da ordem de 375 HV (PESSOA, 2013), ou seja, acima do limite admitido pela norma.

A dureza na ZTA é principalmente influenciada pela composição química do metal de base e pela taxa de resfriamento. Esta, por sua vez, é sempre muito elevada pela ação direta da água, sendo pouco influenciada pelo aporte térmico na soldagem molhada com eletrodos revestidos.

Esta é a situação encontrada na ZTA do metal de base provocada pelos passes de acabamento. Portanto, numa abordagem conservadora, a dureza máxima prevista na ZTA em aços C-Mn pode ser estimada pela bem conhecida relação entre dureza da martensita em função do teor de carbono do aço. Assim, considerando os teores de carbono e manganês especificados para os principais aços estruturais navais conforme a norma ASTM A 131 é necessário lançar mão de técnicas especiais para reduzir sensivelmente a velocidade de resfriamento ou reaquecer as regiões críticas da ZTA para atender ao requisito para classe A do AWS D3.6M 2010 (dureza máxima inferior a 325 HV).

MARINHO (2014) afirma que em testes feitos e publicados recentemente no LRSS-UFMG em parceria com a PUC-RIO e o CENPES, a dureza máxima na zona afetada pelo calor do metal de base dos passes de acabamento foi superior ao especificado não atendendo os requisitos da classe A.

2.4.2 Trincas na região de soldagem

As trincas são consideradas uns dos tipos mais sérios de discontinuidades em soldas. Estas se desenvolvem quando tensões de tração atuam em um material fragilizado, isto é, incapaz de absorver estas tensões por deformação. Os tipos de trincas que podem ser desenvolvidas são normalmente classificados em função da sua localização na solda como: trinca de cratera, trinca transversal na ZF, trinca transversal na ZTA, longitudinal na ZF, trinca de margem, trinca sob o cordão, trinca na zona de ligação e trinca na raiz da solda. Em aços carbono ferríticos podem ocorrer com mais frequência, as trincas induzidas pelo hidrogênio e as trincas de reaquecimento (ASME 1989).

De acordo com LOURENÇATO (2001) não existe uma terminologia universal para diferenciar os tipos de trincas passíveis de ocorrer devido ao processo de soldagem, existindo inclusive diferenças na definição quanto ao tipo de trinca dada por diferentes normas técnicas, por isso neste trabalho será usado a terminologia adotada pela norma AWS B1.11M/B1.11 (2015), que classifica dois tipos de trinca passíveis de ocorrer devido ao processo de soldagem:

- Trincas a quente: trincas que ocorrem em temperaturas próximas ao ponto de fusão e durante a solidificação da zona fundida.
- Trincas a frio: trinca que ocorre após a solidificação da zona fundida devido a presença de hidrogênio.

2.4.2.1 - Trinca a Quente (Trinca de Solidificação)

Trincas de solidificação que ocorrem durante a solidificação do metal ou no resfriamento subsequente devido a formação de fases com ponto de fusão inferiores a temperatura de fusão do metal, que permanecem como filmes líquidos por um curto período de tempo nos contornos de grãos primários já solidificados (KOU, 1987).

Com a solidificação da poça de fusão surgem tensões resultantes da contração do metal. Tais tensões podem gerar a ruptura dos filmes líquidos intergranulares e, por consequência, nuclear a trinca de solidificação no metal de solda (KOU, 1987).

A susceptibilidade a esse tipo de dano em soldagem subaquática molhada é determinada principalmente pelo tipo de estrutura de solidificação do metal de solda, característica desse processo. A forma da poça de fusão influencia o padrão de solidificação final do metal de solda, deixando um filme de metal líquido residual no centro do cordão, esse por sua vez não resiste à esforços presentes no resfriamento (SAVAGE, 1976).

Em soldas subaquáticas molhadas a poça de fusão em forma de lágrima fomenta o crescimento competitivo de grãos, onde apenas um pequeno número favoravelmente orientado é mais hábil para crescer. Dessa forma, uma estrutura de grãos colunares grosseiros, que se encontra no estágio final de solidificação na linha central da junta soldada, concentra a segregação nessa região e favorece o aprisionamento de elementos de soluto (GUERRERO, 2002). A presença de elementos solutos no metal de solda é resultado da segregação de constituintes de baixo ponto de fusão que pode persistir sob forma de filme contínuo, nos contornos de grãos grosseiros, reduzindo a força de coesão sólido/sólido durante o estágio final de solidificação gerando os defeitos e comprometendo as propriedades mecânicas.

2.4.2.2 Trinca a frio induzida pelo hidrogênio

O principal problema que ocorre em soldas molhadas é decorrente do elevado teor de hidrogênio difusível, resultante da dissociação da água por efeito do arco elétrico, que associado a durezas elevadas aumenta a suscetibilidade de formação de trincas por hidrogênio na zona termicamente afetada pelo calor.

YURIOKA, (1990) afirma que o trincamento por hidrogênio é causado pela ocorrência simultânea dos seguintes fatores: Concentração suficiente de hidrogênio difusível, microestrutura susceptível ao hidrogênio, tensão de tração aplicada em suficiente magnitude e

temperatura abaixo de aproximadamente 200°C. Essas condições são facilmente encontradas na soldagem subaquática molhada, particularmente na ZTA (zona termicamente afetada) do metal de solda (KOU, 2003; SILVA, 1983; IBARRA et al., 1995; JOHNSON, 1997). Nessa região a rápida taxa de resfriamento promove a formação de microestrutura martensítica em aços de baixo carbono tornando-os susceptíveis ao trincamento por hidrogênio. (GRUBBS, 1996).

A taxa de resfriamento, composição química e temperabilidade influenciam na microestrutura do cordão de solda. Condições de soldagem molhada podem formar microconstituintes mais duros na zona termicamente afetada e no metal de solda, que são mais susceptíveis à trincas a frio (BAILEY 1994).

Tensões na junta:

As tensões residuais são desenvolvidas durante a solidificação do metal e são influenciadas pela contração térmica e pelo grau de restrição da junta. Em contato com a água tem-se elevado gradiente térmico, e quanto maior esse gradiente maior será a diferença na contração térmica, gerando maiores tensões. Um maior grau de restrição da junta eleva os níveis de tensões residuais aumentando a probabilidade de ocorrer trincas na zona termicamente afetada e no metal de solda (BAILEY 1993).

O tipo de junta também influencia na restrição. Uma junta de topo é menos restrita que uma junta em ângulo. Os concentradores de tensões têm um papel muito importante nos processos de falha por trincas induzidas por hidrogênio.

Presença de hidrogênio:

GRANJON (1972) propôs um modelo para o fluxo de hidrogênio durante a soldagem, conforme mostra a Figura 2.3, onde na solidificação da poça de fusão, o líquido se transforma em austenita, ocasião em que, parte do hidrogênio se desprende para a atmosfera, ficando o restante retido na austenita. A partir do momento em que essa austenita se decompõe em ferrita e cementita, o hidrogênio se difunde para a austenita existente na ZTA, em virtude da maior solubilidade do hidrogênio na austenita.

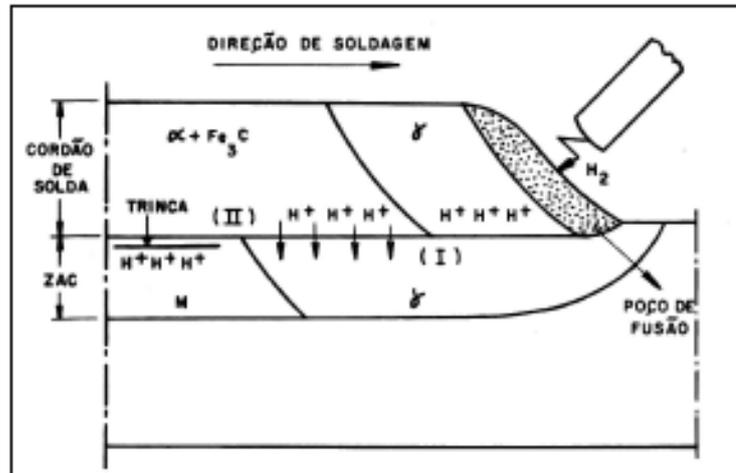


FIGURA 2.3 Fluxo esquemático de hidrogênio na soldagem.
 FONTE: GRANJON adaptado, 1992.

Os eletrodos rútilicos apresentam um alto teor de hidrogênio difusível, valores da ordem de 90ml/100g são registrados pela literatura para metais depositados por este tipo de eletrodo em soldagem subaquática (FILHO et. al, 2004).

Microestrutura suscetível:

As trincas induzidas por hidrogênio são favorecidas pela presença de microestruturas de elevada dureza e baixa ductilidade, ou seja, que apresente uma baixa capacidade de acomodar as tensões resultantes da solda. Estruturas de baixa dureza podem tolerar uma maior quantidade de hidrogênio sem trincar. O valor da dureza da microestrutura pode ser utilizado como parâmetro para medir a susceptibilidade ao trincamento. A dureza da ZTA de um determinado aço depende da velocidade de resfriamento no intervalo de transformação (normalmente de 800 a 500 °C), do seu teor de carbono e da sua temperabilidade.

Soldas molhadas em aços carbono com CE acima de 0.4% são mais susceptíveis ao trincamento por hidrogênio na ZTA (YURIOKA, 1982), isso porque tendem a apresentar na ZTA estruturas de elevada dureza, como a martensita. O carbono equivalente, de acordo com o IIW, pode ser calculado pela fórmula dada na Equação 1 (CE_{IIW}):

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

As quatro condições necessárias para ocorrência do trincamento por hidrogênio são atendidas, na soldagem molhada, da seguinte maneira: Grande concentração de hidrogênio na junta de solda devido à dissociação da água durante a soldagem. Microestrutura de alta dureza e suscetível ao trincamento devido ao resfriamento rápido. Elevadas tensões geradas pelo alto gradiente térmico imposto nas juntas. Por fim, baixas temperaturas (0°C a 30°C) que são as temperaturas de trabalho das estruturas soldadas.

2.4.4 Grãos colunares

A taxa local de solidificação de uma solda depende somente da velocidade de soldagem e do ângulo entre a direção de soldagem e a direção perpendicular da interface líquido/sólido. POPE et al (1995) investigaram a forma da poça de fusão em soldas subaquáticas. Foi constatado que a poça de fusão oriunda de soldagem subaquática molhada possui formato em lágrima, independente da velocidade do eletrodo. A Figura 2.5 mostra uma comparação da forma da poça de fusão para soldas feitas ao ar e em água. A taxa de solidificação pode ser calculada pela seguinte Equação 2 (DAVID & VITEK, 1989):

$$R = V \cos \theta \quad (2)$$

Onde R é a taxa de solidificação ou taxa de crescimento, V é a velocidade de soldagem e θ é o ângulo que varia de 90° (normal a linha central do cordão) a 0° (paralelo a linha central do cordão). Sendo assim, tem-se a maior taxa de solidificação na região paralela à linha central do cordão ($\theta = 0^\circ$).

Baseados na forma da cratera POPE et al (1995), determinaram que a taxa de solidificação é menor para as soldas molhadas do que para as soldas secas, apesar de a taxa de resfriamento maior nas soldas molhadas, a Figura 2.5 ilustra a diferença entre as formas de uma solda molhada e uma solda seca.

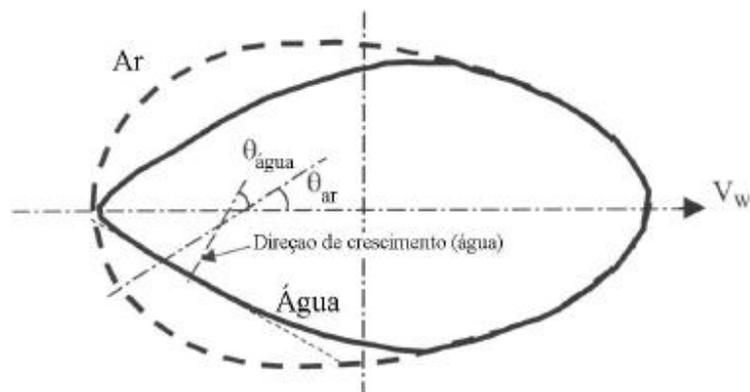


FIGURA 2.4- Comparação entre as formas das crateras de soldas molhadas e secas.
 FONTE – POPE et al. 1995.

É ilustrado na Figura 2.6 a diferença entre a taxa de crescimento dos grãos quando analisados em relação à linha paralela central do cordão e evidencia que a forma de lágrima da poça de fusão em soldas molhadas provoca uma menor taxa de crescimento nas mesmas.

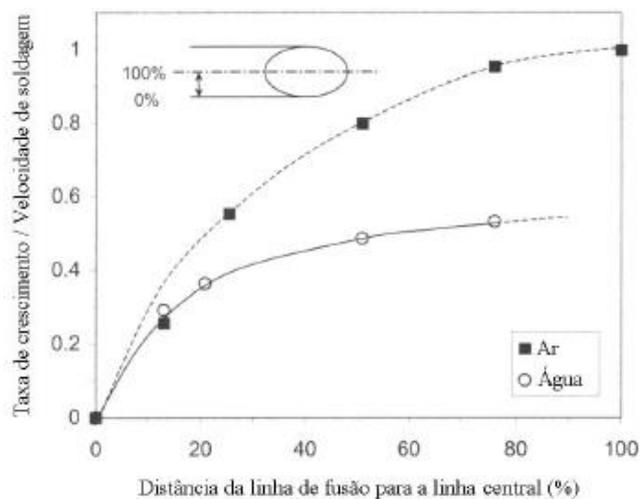


FIGURA 2.5- Comparação entre a taxa de crescimento das soldas molhadas e soldas secas.
 FONTE – POPE et al. 1995.

Devido a esse fenômeno e também ao crescimento competitivo, os grãos austeníticos primários colunares são maiores na soldagem molhada. A forma de lágrima da poça de fusão se deve ao efeito exercido pela presença da bolha de vapor d'água na transferência de calor nas soldas subaquáticas.

GUERRERO (2002), realizou estudo semelhante e constatou que a taxa de resfriamento é maior para as soldas molhadas que para as soldas secas, Figura 2.7. Para ambos os autores os

grãos austeníticos colunares são maiores nas soldas molhadas devido ao crescimento competitivo, induzido pela forma de lágrima da poça de fusão, que beneficia os grãos com orientação favorável, permitindo que eles cresçam preferencialmente.

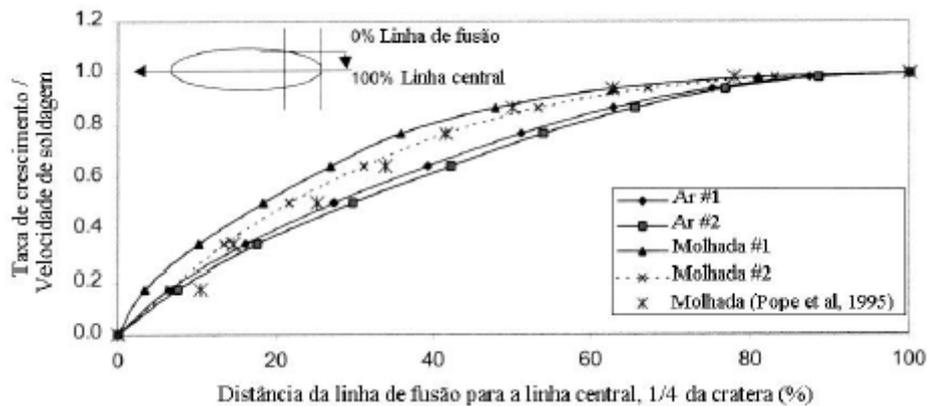


FIGURA 2.6- Comparação entre taxa de crescimento relativo entre soldas molhadas e secas para um quarto de cratera.

FONTE – GUERRERO, 2002.

PESSOA et al (2004) afirmam que as regiões colunares são notadamente mais propícias ao trincamento à quente, uma vez que são caminhos preferenciais para a propagação de trincas.

2.5 Sub-regiões da região de soldagem com passe único

Na soldagem com passe único, a solda é dividida em três regiões: zona fundida (ZF) constituída pelo metal fundido; zona de ligação (ZL), constituída por uma estreita região onde ocorre uma fusão parcial do metal base junto à zona fundida e a zona afetada pelo calor (ZTA), região do metal base que sofreu alterações microestruturais causadas pelo calor da soldagem (BHADESHIA & HONEYCOMBE, 1980). A ZTA dos aços pode ainda ser subdividida nas regiões descritas a seguir (BRANDI & WAINER, 1992), lustradas na Figura 2.8.

Durante a soldagem, pode se encontrar até quatro sub-regiões da ZTA formadas de acordo com a máxima temperatura alcançada e o tempo de permanência nesta temperatura. A formação destas sub-regiões é determinada pela transformação característica do aço (WTIA, 2006). A seguir estão relacionadas estas sub-regiões:

- Grãos grosseiros: 1100 a 1500°C - líquido.
- Grãos finos: 900 - 1030°C;
- Intercrítica: 730 - 900°C;
- Subcrítica: 500 - 700°C;

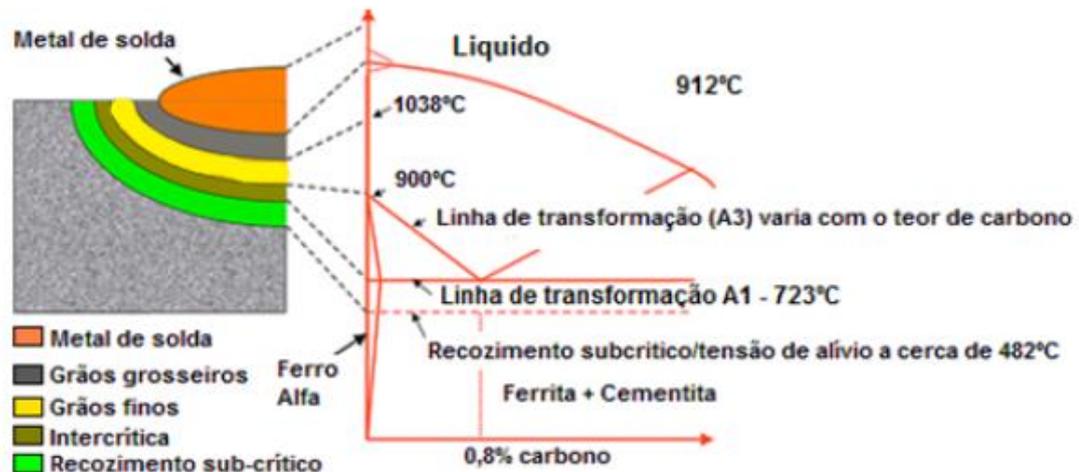


FIGURA 2.7 - Esquema de uma soldagem com passe único com indicação das subdivisões da ZTA.

FONTE – SPERKO – 2006, p. 37.

- ZTA de grãos grossos (ZTA-GG) – trata-se da região adjacente à linha de fusão (ZL), que é aquecida a temperaturas entre 1100 e 1500 °C, transformando-se totalmente em austenita no momento da soldagem. Sua microestrutura final depende da composição química do material e da velocidade de resfriamento. As temperaturas próximas à linha de fusão estão bem acima da temperatura A_{c3} , isso provoca um superaquecimento da austenita, resultando em uma microestrutura de grãos grosseiros de elevada temperabilidade, podendo ter elevada dureza e baixa tenacidade, favorecendo o aparecimento de trincas.
- ZTA de grãos finos (ZTA-GF) – Esta região é aquecida entre 900 e 1200 °C. e é caracterizada pelo seu menor tamanho de grão. Quanto mais afastada da linha de fusão, menor o tamanho de grão da austenita, o que reduz a sua temperabilidade e pode causar a sua transformação em ferrita produzindo uma microestrutura refinada, tendo grãos menores do que os do metal de base, correspondendo à microestrutura típica do aço normalizado e com boa tenacidade.
- ZTA intercrítica (ZTA-IC) – região da ZTA em que a faixa de temperatura de pico está entre A_{c1} e A_{c3} . Nesta faixa, a microestrutura será composta por austenita nas

regiões que alcançaram energia suficiente para sofrer a transformação e ferrita e perlita não transformadas em regiões de menor energia. Nessa região ocorre refino de grão ao final do resfriamento.

- ZTA subcrítica (ZTA-SC) – Encontra-se entre 500 e 700 °C. Como a temperatura de pico é menor do que A_{C1} não são observadas mudanças estruturais visíveis. Na soldagem dos aços temperáveis, o aporte térmico provoca um revenimento na microestrutura.

O pico de temperatura da zona fundida excede o ponto de fusão do metal base. A composição química do metal de solda depende da escolha dos consumíveis, da taxa de diluição do metal base e das condições de soldagem.

A composição química da ZTA permanece inalterada por uma larga faixa onde o pico de temperatura não atingiu o ponto de fusão do metal base. Todavia, ocorre uma mudança considerável na microestrutura da ZTA durante a soldagem devido ao severo ciclo térmico.

O metal imediatamente vizinho à zona fundida é aquecido dentro do campo austenítico, onde os precipitados que se formaram em processos anteriores são geralmente dissolvidos. Essa região (ZTA-GG) é a que mais apresenta os problemas em soldagem subaquática, pois nela tem-se a presença de grãos excessivamente grandes, fator que favorece a formação de uma microestrutura muito dura e frágil, a martensita, sendo assim mais susceptível ao trincamento a frio.

2.6 Sub-regiões da região de soldagem multipasses

KÜCHLER (2009) diz que a soldagem multipasses apresenta algumas vantagens sobre a soldagem de passe único, que serão descritas a seguir.

- Devido aos ciclos térmicos de reaquecimento, cada passe subsequente provoca uma normalização e um refino dos grãos da camada anterior.
- O ciclo térmico provoca revenimento no metal de solda, diminuindo as tensões residuais do passe anterior.

A Figura 2.9 apresenta o diagrama esquemático de uma soldagem multipasses e do efeito de sobreposição dos passes de revenimento. Observa-se que parte do MS e da ZTA são refundidos pelo passe subsequente.

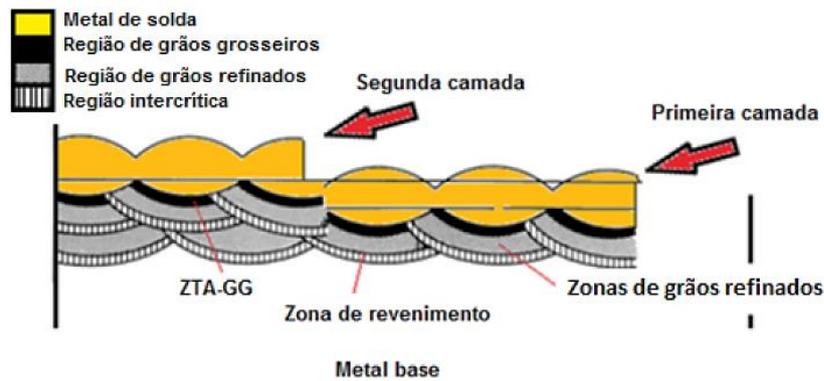


FIGURA 2.8- Diagrama esquemático de uma soldagem multipasses e o efeito do revenimento.
 FONTE - ASM Metals Handbook, 1993.

2.7 Técnicas de reparo por soldagem sem TTPS

Os aços temperáveis, quando soldados, apresentam estruturas martensíticas não revenidas de elevada dureza e baixa tenacidade que, associadas às tensões residuais, podem gerar trincas. Como prevenção, realiza-se um tratamento térmico para aliviar as tensões internas e melhorar as propriedades mecânicas. A soldagem destes aços sem tratamento térmicos posterior constitui um recurso atrativo, pois os tratamentos térmicos em geral, são caros e demorados devido ao tempo de permanência no forno podendo, ainda, apresentar dificuldades quando realizadas em grandes estruturas.

Dentre as técnicas de reparo por soldagem multipasses que objetivam dispensar o TTPS, as principais são as da meia camada e da dupla camada que, através de procedimentos de soldagem estritamente especificados e controlados, aproveitam o calor transferido no próprio processo para tratar termicamente a ZTA do metal de base, de modo a obter uma microestrutura adequada, com os requisitos mínimos de tenacidade e de dureza máxima. Esses requisitos são definidos com o objetivo de garantir a integridade do componente reparado, em particular prevenir a fratura frágil, as trincas de reaquecimento ou as trincas por corrosão sob tensão.

2.7.1 Técnica da meia camada

A técnica da meia camada recomendada pelo código ASME visa proporcionar o refino e o revenimento da ZTA-GG da primeira camada numa solda multipasse, pela sobreposição dos ciclos térmicos. O código especifica a remoção da metade da primeira camada para facilitar a sobreposição do ciclo térmico da segunda camada. Essa técnica é de difícil realização devido

a falta de controle na remoção da metade da primeira camada por esmerilhamento e também por ser muito trabalhosa.

Um esquema da técnica da meia camada é mostrado na Figura 2.10, essa técnica adotada pelo código ASME, foi desenvolvida para o reparo de vasos de pressão de aços ferríticos em usinas nucleares. Como requisitos, o Código ASME (1989) especifica:

- Depositar a 1ª camada na cavidade a reparar, utilizando eletrodo de pequeno diâmetro (máximo 2,5 mm).
- Remover a metade da espessura da 1ª camada, mediante esmerilhamento.
- Depositar a 2ª camada com eletrodo de diâmetro máximo de 3,25 mm, e as camadas subsequentes com diâmetros entre 3,25 e 4 mm.
- completar a junta com pelo menos uma camada de reforço, a qual será removida de modo a deixar a superfície reparada a nível com o resto da peça.

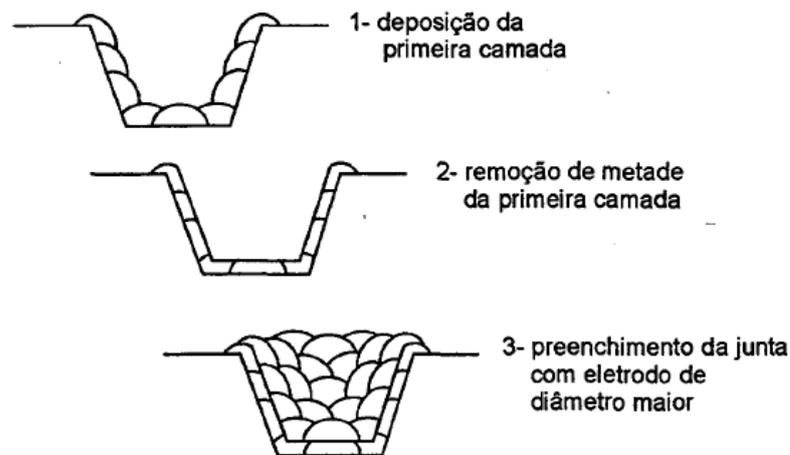


FIGURA 2.9- Esquema da técnica de meia camada.

FONTE – (HIGUCHI, 1980).

A aplicabilidade dessa técnica tem sido discutida amplamente. HIGUCHI et al (1980) questionam a validade do requerimento de remover metade da 1ª camada, não importando qual seja a espessura de reforço da camada que, para um mesmo diâmetro de eletrodo, pode variar largamente em função das condições de soldagem.

2.7.2 Técnica da dupla camada

É comumente empregado, em operações de reparo utilizando dupla camada, o processo de soldagem com eletrodo revestido devido à facilidade de aplicação em locais de difícil acesso,

podendo ser utilizado em todas as posições e não requer ajustes elaborados. Porém, por ser um processo manual, requer a habilidade manual e técnica do soldador.

Para o desenvolvimento da técnica de dupla camada algumas ações, a seguir descritas, são necessárias (NIÑO, 2001).

- Estimar a penetração, a largura e o reforço do cordão de solda em função das condições de soldagem.
- Determinar, através dos ciclos térmicos de soldagem, o grau de revenimento e refino do grão.
- Estimar, com a maior precisão possível, os ciclos térmicos de soldagem e determinar a distribuição das temperaturas de pico na peça.

Deve-se utilizar consumíveis de baixo hidrogênio para minimizar o risco de trincas a frio e realizar preaquecimento para controlar o resfriamento o que facilita a difusão do hidrogênio e reduz as tensões residuais.

A técnica de dupla camada, conforme descrito anteriormente, consiste em promover uma adequada sobreposição dos ciclos térmicos de tal forma que a segunda camada promova o refino e o revenimento da ZTA-GG da primeira camada, conforme mostra a Figura 2.11.

A literatura sugere que a energia da segunda camada deve ser maior que a da primeira para ocasionar o refino na ZTA-GG da 1ª camada. Esta relação deve ser determinada em função da velocidade de soldagem, do tipo de eletrodo e dos parâmetros do processo de soldagem adotado (NIÑO, 2001).

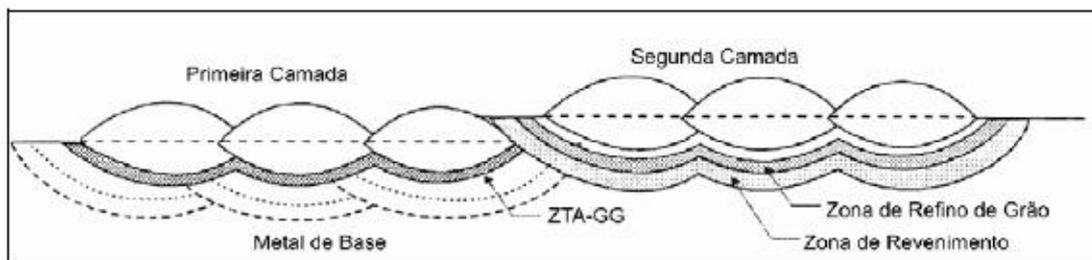


FIGURA 2.10- Esquema das sub-regiões da ZTA em uma soldagem multipasses.
FONTE – NIÑO, 2001.

Processos de soldagem utilizados na aplicação da dupla camada

Comumente é utilizado o processo eletrodo revestido, pois pode ser facilmente aplicado em locais de difícil acesso, em todas as posições e não requer ajustes sofisticados das condições

de processo (TEIXEIRA, 1992) entretanto, por ser um processo manual, os resultados dependem em grande parte da habilidade manual do soldador e do conhecimento técnico que ele tenha do próprio processo e dos objetivos almejados com a aplicação da técnica da dupla camada.

2.8 Passe de revenimento

Esta técnica de soldagem foi desenvolvida especificamente para refinar a microestrutura no metal pelo depósito criterioso de cordões de solda e do controle da energia da soldagem. Este tratamento térmico visa melhorar a tenacidade à fratura e reduzir a dureza elevada da ZTA; (WTIA, 2006).

A técnica do passe de revenimento foi utilizada por AZEVEDO (2002) que aplicou a técnica da dupla camada nos aços AISI 1045, onde alcançou os resultados de tenacidade semelhantes aos corpos de prova tratados termicamente após a soldagem, empregando várias relações de energia.

2.8.1 Aplicação do passe de revenimento

O tratamento do cordão de solda por passe de revenimento foi desenvolvido para reduzir a dureza do MS e da ZTA. Há alegações (NIÑO, 2001) de que as propriedades mecânicas da ZTA podem ser melhoradas semelhantemente às melhorias obtidas com tratamento térmico convencional.

O passe de revenimento visa reduzir a dureza da ZTA por imposição do seu ciclo térmico. Para tanto o passe de revenido deve ser posicionado adequadamente em relação ao passe a revenir, de modo que a isoterma AC_1 da camada subsequente encoste-se à linha de fusão da camada anterior, assim o metal de base é reaustenitizado e o resto da ZTA é revenida abaixo da faixa de temperatura de transformação (WTIA, 2006). É apresentado na Figura 2.12 um esquema apresentando o amaciamento da ZTA com passe de revenimento.

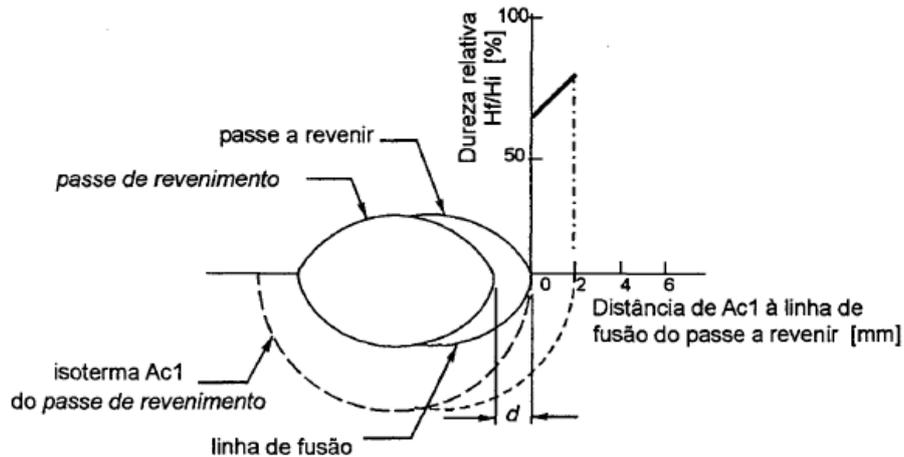


FIGURA 2.11- Queda relativa de dureza em função da distância entre a ZL.
 FONTE - (WTIA, 2006).

OSLEN et al (1982) ainda descreve o passe de revenimento como uma técnica amplamente usada para reduzir a dureza da ZTA, visando diminuir as chances de ocorrer trincas induzidas por hidrogênio. O passe de revenimento, quando especificado, seria tratado como uma variável essencial (isto é, se é usado na qualificação de um procedimento de soldagem, também deve ser usado nas soldagens em campo).

Porém é muito difícil a boa implementação desta técnica em campo devido ao alto grau de dificuldade no controle do cordão depositado pelos soldadores quando submetidos ao ambiente subaquático.

2.8.2 A martensita e o revenimento

A transformação da austenita em martensita ocorre por um rápido processo de cisalhamento, que normalmente não é acompanhado por difusão. Como resultado, obtém-se uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro, a qual tem uma estrutura tetragonal de corpo centrado, que é uma forma distorcida do ferro CCC (SHEWMON, 1969).

Na Figura 2.13 é apresentado a influência do teor de carbono sobre a dureza da martensita, assim como também a grande diferença de durezas entre a martensita, a perlita e esferoidita. A dureza da martensita é independente do teor de elementos de liga substitucionais, sendo que estes são adicionados principalmente por causa de seu efeito em retardar a formação da perlita e da bainita.

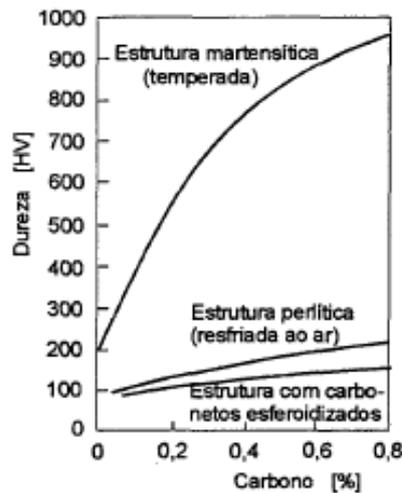


FIGURA 2.12- Influência do teor de carbono sobre a dureza da martensita, da perlita e de uma estrutura de carbonetos esferoidizados.

FONTE - SHEWMON, 1969.

De acordo com CHIAVERINI (1977), o revenimento se consiste de um aumento de temperatura inferiores à da zona crítica, sendo aplicado aos aços temperados, resultando em modificações da estrutura obtida na têmpera. Tem-se uma melhora da ductilidade e redução da dureza ao mesmo tempo que tensões internas são aliviadas ou eliminadas. As propriedades finais do material revenido dependem do tempo e temperatura do processo, podendo ser intensa a modificação estrutural adquirindo melhores condições de usinabilidade (menores valores de dureza). Na Tabela 2.2 (no tópico 2.10.1), são apresentados os valores de dureza e alongamento para o aço ABNT 1045 para diferentes temperaturas de revenimento.

2.9 - Alguns dos elementos necessários para desenvolver a técnica da dupla camada

Alguns dos elementos necessários para conseguir modelar essa técnica são:

- Conhecer qual é a resposta do material, em termos de revenimento, refino de grão, fenômenos de precipitação e segregação, em função dos ciclos térmicos de soldagem.
- Estimar a geometria do cordão de solda (penetração, largura e reforço) em função das condições de soldagem, incluindo dentre estas o tipo de processo, os valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem, a posição de soldagem e as características dos consumíveis.
- Poder calcular os ciclos térmicos de soldagem e o campo de temperaturas, isto é, a distribuição das temperaturas de pico na peça.

Os principais parâmetros a serem observados para a obtenção do sucesso na operação descritos abaixo

- Dimensões do cordão da primeira camada.
- Relação adequada entre as energias de soldagem das camadas.
- Controle da temperatura de preaquecimento e interpasse durante a soldagem.

2.10 Aço ABNT 1045

O aço ABNT 1045 segundo a NBR 172/2000 é classificado como aço para construção mecânica, ao carbono e especial (ABTN, 2000).

De acordo com a norma NBR NM 87/2000, que estabelece as composições químicas dos aços para construção mecânica, o aço ABNT 1045 deve apresentar a composição química descrita na Tabela 2.1.

TABELA 2.1- Composição química do aço ABNT 1045 (% em massa).

C	Mn	P máximo	S máximo	Si
0,43-0,50	0,60-0,90	0,04	0,05	0,10-0,60

FONTE - ABTN, 2000.

2.10.1 Aplicações e propriedades mecânicas do aço ABNT 1045

O aço ABNT 1045 é utilizado, dentre outras aplicações, em eixos de bombas das torres de destilação e em eixos de ventiladores que são empregados nas refinarias do setor de petróleo e gás, geralmente sofrendo desgaste devido ao ambiente agressivo ao qual são expostos.

Devido ao aço ABNT 1045 apresentar entre 0,43 a 0,50% de carbono, quando submetido a ciclos térmicos de soldagem desenvolve elevada dureza na zona afetada pelo calor (ZTA) e apresenta baixa resistência ao revenimento. A Tabela 2.2 mostra as propriedades mecânicas do aço ABNT 1045 em função da temperatura de revenimento.

TABELA 2.2- Propriedades Mecânicas do aço ABNT 1045.

Temperatura de Revenido (°C)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
205	1132	363
260	1111	352
315	1070	341
370	1029	331

425	967	311
480	906	293
540	823	277
595	768	255
650	720	241

FONTE – METALS HANDBOOK, 1991.

2.10.2 Temperabilidade do aço ABNT 1045

A temperabilidade tem sido usada como um indicador de soldabilidade e como um guia para a seleção de materiais e processos, de forma a evitar um excessivo endurecimento e, conseqüentemente, a ocorrência de trincas na ZTA. Aços com alta temperabilidade proporcionam uma elevada fração volumétrica de martensita na ZF e na ZTA. Como se sabe, dependendo do seu teor de carbono, essa microestrutura pode ser altamente susceptível a trincas induzidas por hidrogênio (BAILEY, 1994).

Várias equações empíricas foram desenvolvidas para expressar a soldabilidade dos aços. Equações do carbono equivalente (CE) foram as primeiras expressões utilizadas para estimar a susceptibilidade a trincas do aço no processo de soldagem e também para determinar a necessidade de preaquecimento e pós-aquecimento para evitar estas trincas. Estas equações contemplam os efeitos de diversos elementos químicos na temperabilidade do aço.

O diagrama de GRAVILLE (1976) representado na Figura 2.14, mostra a susceptibilidade a trincas induzidas por hidrogênio em função do teor de carbono e do carbono equivalente. Nessa figura a zona I é própria dos aços de baixo carbono e relativa baixa temperabilidade, os quais não são muito susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio. Na zona II os aços têm carbono mais alto que os da zona I, mas apresentam baixa temperabilidade, sendo, portanto, possível evitar microestruturas sensíveis a trincas pelo controle do resfriamento da ZTA. Isso pode ser alcançado através do controle da energia de soldagem e da utilização de preaquecimento. Na zona III, os aços têm elevados teores de carbono e temperabilidade alta, podendo facilmente produzir microestruturas sensíveis às trincas. Para se evitar as trincas induzidas por hidrogênio nessa zona, deve-se usar processos de baixo hidrogênio, preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem (METALS HANDBOOK, 1992).

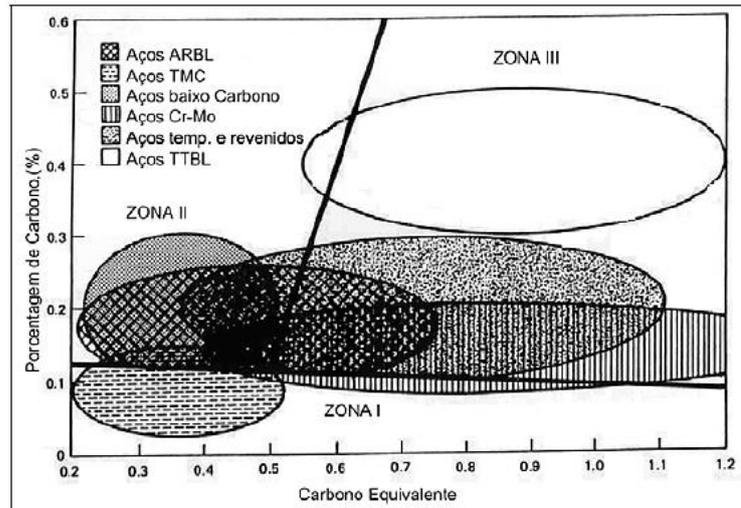


FIGURA 2.13- Diagrama de Graville.

FONTE – METALS HANDBOOK, 1992.

Através da Figura 2.14, observa-se que os aços com médio teor de carbono se enquadram na zona II, requerendo, portanto, um controle de resfriamento da ZTA quando soldados. Os aços de baixo carbono, de espessuras finas, são facilmente soldados. Quando se trata de aços de grandes espessuras, são necessários alguns cuidados devido a maior velocidade de resfriamento possibilitar a formação de microestruturas frágeis. Os aços menos susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio estão situados no canto inferior esquerdo da Figura 2.14, zona I. Essa figura representa a temperabilidade dos aços. Existem vários outros aspectos de soldabilidade a serem considerados (METALS HANDBOOK, 1992).

A estrutura da ZTA de granulação grosseira de um dado aço pode ser prevista com a utilização de diagramas de Transformação de Resfriamento Contínuo (TRC) desenvolvidos especialmente para a soldagem. Eles são semelhantes aos diagramas TRC usuais, exceto pela sua elevada temperatura de austenitização, em torno de 1300°C. O diagrama TRC para a ZTA apresenta características que afetam o tamanho do grão austenítico e sua homogeneidade, dificultando a sua aplicação para prever a microestrutura da ZTA de uma solda real (MODENESI, 1992).

Na Figura 2.15 tem-se o diagrama TRC para o aço ABNT 1045. Percebe-se que próximo à temperatura de início de transformação da martensita, M_i , para uma mesma taxa de resfriamento, a curva de transformação para soldagem desloca-se para direita em relação à curva de transformação de tratamento térmico, desta maneira, a probabilidade de formar martensita neste aço é maior na soldagem do que durante o tratamento térmico. Um exemplo, mostrado na Tabela 2.3, com dados retirados da Figura 2.15, indica que para uma taxa de

resfriamento de 30° C/s, pode ser obtido 92% de martensita na soldagem e somente 69% no tratamento térmico. Isto pode estar relacionado ao crescimento de grão da austenita que pode acontecer durante a soldagem, diminuindo a área de contorno de grão disponível para a nucleação dos constituintes intermediários durante o resfriamento (KOU, 1987).

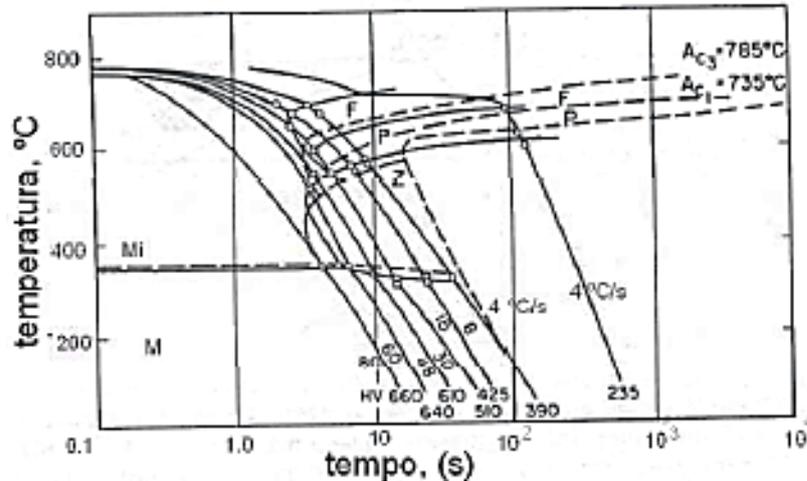


FIGURA 2.14- Diagramas TRC de um aço ABNT 1045 durante tratamento térmico (linhas pontilhadas) e durante soldagem (linhas cheias).

FONTE – KOU, 1987.

TABELA 2.3- Microestrutura do aço ABNT 1045 devido a soldagem e ao tratamento térmico

Taxa de Resfriamento (° C/s)	Microestrutura (%)		
	Ferrita	Perlita+estrutura intermediária	Martensita
4	5(10) ^a	95(90)	0(0)
18	19(30)	9(70)	90(27)
30	1(1)	7(30)	92(69)
60	0(0)	2(2)	98(98)

^a- Os valores entre parênteses referem-se ao percentual de fase para o tratamento térmico.

FONTE - (KOU, 1987).

Os contornos de grãos constituem um local preferencial para a nucleação de novas fases. Quanto maior o tamanho do grão austenítico menor a quantidade de contorno por unidade de volume, portanto, maior o tempo de incubação da austenita e maior a temperabilidade do aço. Este fato justifica a facilidade da ZTA-GG em formar martensita.

Uma vez que a temperatura máxima alcançada e a velocidade de resfriamento varia de ponto a ponto na ZTA e cada curva de resfriamento cruza o diagrama em locais específicos, a ZTA apresenta microestruturas diferentes a cada ponto. Próximo à linha de fusão, na soldagem

dos aços ao C-Mn e baixa liga as microestruturas prováveis são martensita e bainita para um carbono equivalente adequado (AGUIAR, 2001).

2.11 Ensaio de Dureza

Talvez por ser a dureza uma característica fácil de medir (seja em laboratório ou em campo), numerosos trabalhos procuram correlacioná-la com as microestruturas e propriedades dos materiais. Em soldagem essa característica é mais valiosa ainda, haja vista a multiplicidade de microestruturas presentes na ZTA, em função dos elevados gradientes de temperatura. Por exemplo, hoje em dia valores limites de dureza de 350 e 248 HV são, respectivamente, especificados na literatura e em normas de fabricação por soldagem, para evitar trincas a frio (COE, 1973) e trincas por corrosão sob tensão (NACE, 1990).

É apresentado na Figura 2.16 um esquema da medição de dureza vickers, onde em A o penetrador está realizando a indentação e em B a marca da indentação produzida pela penetração. Nota-se que quanto menor for a dureza do material, menor será a capacidade do material resistir à penetração e em consequência, maior será o valor de d_1 e d_2 .

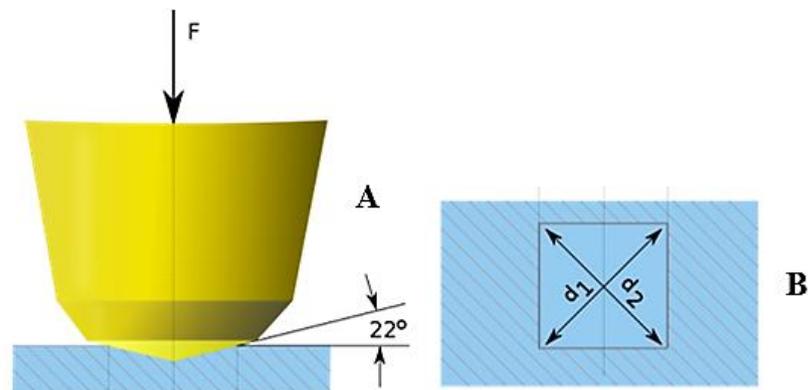


FIGURA 2.15 - Medição de impressão na dureza vickers.

FONTE: WIKIMEDIA, 2017.

3. METODOLOGIA

O trabalho tem como objetivo principal avaliar o efeito do esmerilhamento e da inversão de sentido nas propriedades microestruturais e conseqüentemente nas propriedades mecânicas das Zonas Termicamente Afetadas (ZTAs) de juntas soldadas pelo processo de soldagem subaquática molhada. Assim sendo é importante o conhecimento do material de base utilizado, do eletrodo consumível que efetuará a soldagem e da energia de soldagem imposta pelo processo.

Esse capítulo descreve como foi realizada a escolha de cada material e parâmetro de soldagem utilizado, apresenta também a metodologia empregada nos processos de esmerilhamento e inversão de sentido quando esses eram empregados e além disso como foram avaliadas as propriedades afim de verificar se houve ou não melhoria nas propriedades do corpo de prova soldado.

3.1 Materiais

3.1.1 Metal base

Para garantir uma composição química necessária para que a ZTA do processo apresentasse maior valores de dureza optou-se pelo uso de um aço carbono SAE 1045, com composição química fornecida na Tabela 3.1 abaixo.

TABELA 3.1 - Composição química do aço ABNT 1045 utilizado (% em massa).

C	Mn	P	S	Si
0,46	0,68	0,022	0,02	0,17

Além da análise química do material, dada pelo fornecedor, foram realizadas análises metalográficas para caracterização do material. A Figura 3.1 apresenta a microestrutura do metal de base utilizado como recebido com um aumento de 200X.

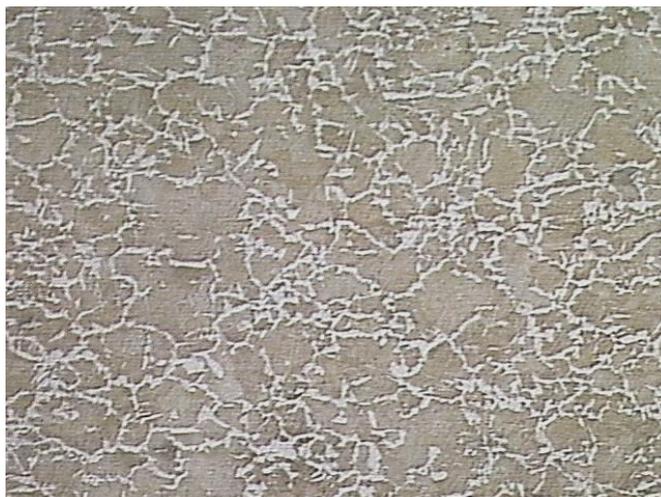


FIGURA 3.1 - Aço SAE 1045 utilizado, aumento de 200X.

FONTE – Autor.

Ainda com a intenção de caracterizar o material e verificar se o mesmo atenderia o propósito do trabalho que é de obter altos valores de dureza quando submetidos à resfriamento brusco, realizou-se um aquecimento em forno até uma temperatura de 900°C e 30 minutos em um corpo de prova de 40x40x40[mm], sendo em seguida temperado em água. Após a têmpera realizou-se testes de dureza na superfície e análise metalográfica da superfície, a dureza atingiu valores da ordem de 600 HV5 (carga de aplicada por 15 segundos).

3.1.2 Preparação do Chanfro

A configuração do chanfro utilizado no trabalho teve como a principal finalidade gerar uma ZTA com geometria bem comportada, ou seja, com essa configuração é mais fácil prever a extensão e localização da ZTA bem como cada uma de suas regiões (zona dura e zona amaciada).

Na Figura 3.2 é apresentado o chanfro que foi desenvolvido especialmente para esse trabalho. Ele possuía 200mm de comprimento, garantido que todo o cordão de solda seja depositado dentro do chanfro. Além disso pode-se utilizar partes centrais do cordão para fazer as análises, não sendo necessário utilizar regiões de instabilidade como a região de abertura de arco.

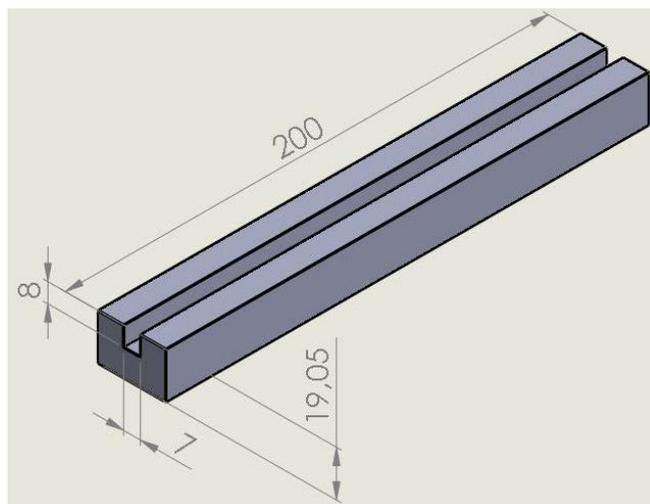


FIGURA 3.2 Chanfro de bordas paralelas utilizado neste trabalho.
FONTE – Autor.

Na Figura 3.3 é apresentado a seção transversal do chanfro utilizado para preenchimento. Esse foi desenvolvido para entender o desenvolvimento da ZTA a cada passe, possui abertura de 7mm e suas paredes são paralelas entre si.

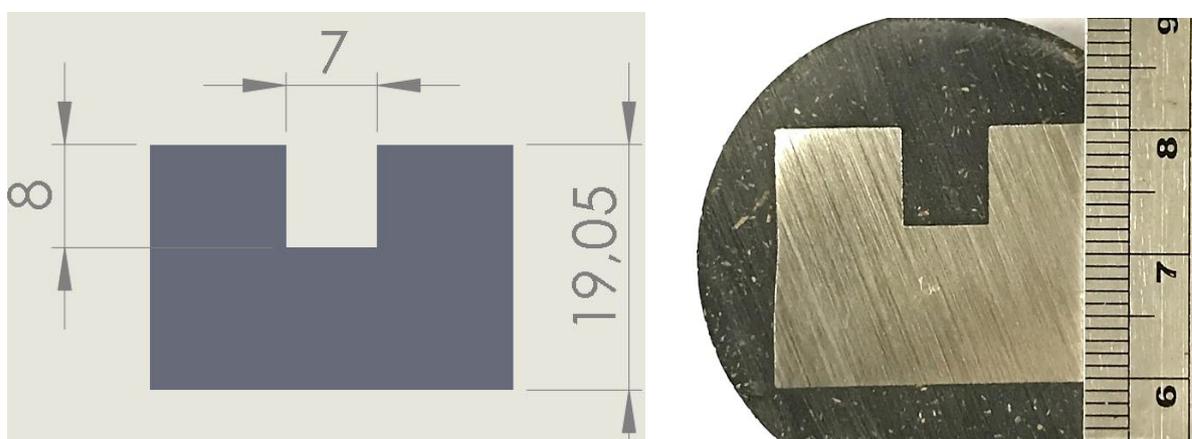


FIGURA 3.3 - Chanfro de bordas paralelas utilizado neste trabalho.
FONTE – Autor.

3.1.3 Eletrodos

Os eletrodos utilizados nesse trabalho eram do tipo rutílico AWS E 6013 e estavam de acordo com a norma AWS, com uma bitola nominal de 3,25mm.

Envernizamento dos eletrodos

Para evitar que o revestimento do eletrodo absorva água no momento que for submerso, todos os eletrodos receberam duas camadas de verniz vinílico. Essa camada é impermeável e impede que a água degrade as propriedades do revestimento, possibilitando a soldagem. O verniz incolor utilizado é próprio para esta aplicação, com formulação a base de resina vinílica cetona.

Cada eletrodo recebeu uma camada de verniz e foi colocado sobre um suporte para escorrer o excesso de produto e secar a primeira camada. Uma segunda camada de verniz foi depositada 24 depois e, novamente, os eletrodos foram deixados sobre o suporte para escorrer o excesso de verniz e secar.

3.2 Equipamentos de soldagem

Os equipamentos utilizados para realização do trabalho foram disponibilizados pelo LRSS – Laboratório de Soldagem e Simulação da Universidade Federal de Minas Gerais, desde máquinas dedicadas à realização de soldas subaquáticas à equipamentos de corte e análise de peças metalográficas.

3.2.1 Tanque hiperbárico

Para simular a profundidade de 10 metros desejada, utilizou-se um tanque hiperbárico, com capacidade de simular profundidades da ordem de 150m. A escolha dos 10 metros de profundidade foi em função de trabalhos feitos no próprio LRSS, onde tem-se para essa profundidade uma menor ocorrência de porosidade no metal de solda. Assim sendo, a profundidade foi a mesma utilizada para todos os corpos de prova ensaiados. A Figura 3.4 apresenta o tanque utilizado para este trabalho. Para simular a profundidade é insuflado ar

comprimido até a pressão desejada. Essa pode ser controlada e verificada por um manômetro instalado no próprio tanque.



FIGURA 3.4 - Tanque hiperbárico utilizado para realizar soldas molhadas e simular profundidade.

3.2.2 Fonte de soldagem

A fonte utilizada para soldagem de todos corpos de prova foi uma máquina dedicada à realização de soldas subaquáticas molhadas e operam com curvas características e condições dinâmicas que melhoram a estabilidade do processo debaixo d'água. A fonte submarina IMC Hiper-1 é apresentada na Figura 3.5.



FIGURA 3.5 - Fonte de soldagem IMC Hiper-1 utilizada para soldagem subaquática dos corpos de prova.

3.2.3 Sistema de soldagem por gravidade

O sistema de soldagem por gravidade para SMAW baseia-se na inclinação e na taxa de fusão do eletrodo, em fusão dessas duas variáveis tem-se a velocidade de soldagem. Foram realizados diversos testes, para chegar na melhor condição de soldagem, avaliando principalmente aspectos visuais como ausência de mordeduras, ausência de reforço excessivo e poros superficiais. É apresentado na Figura 3.6 o esquema com os ângulos importantes que influenciam na velocidade de soldagem do processo.

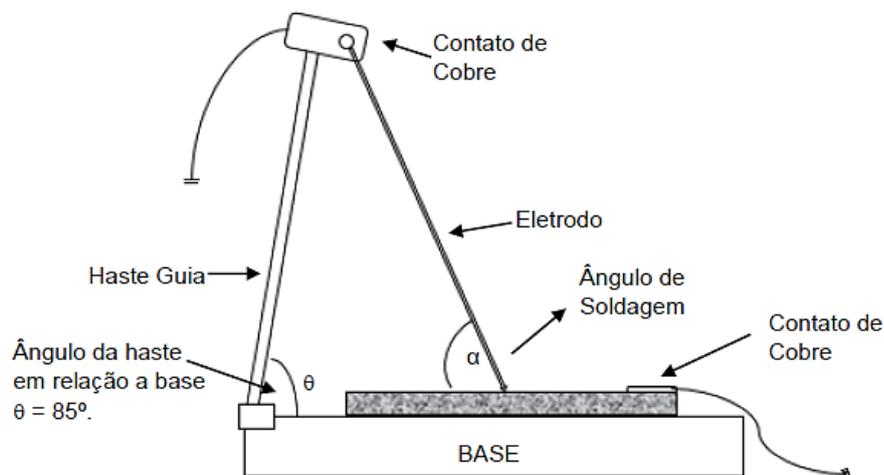


FIGURA 3.6- Esquema do dispositivo mecanizado de soldagem por gravidade utilizado neste trabalho.

O sistema possui dois ângulos α (60°) e θ (85°), após selecionado os ângulos eles não foram mais alterados, evitando a influência de diferentes velocidades de soldagem nos corpos de prova.

3.3 Cálculo da energia de soldagem

Como apresentado, a energia de soldagem tem extrema importância na extensão e comportamento da ZTA, e essa zona é o principal objetivo da pesquisa. MODENESI (2003) diz que a energia de soldagem (H) pode ser calculada da forma apresentada na Equação 3:

$$H = \frac{VI}{v} \quad (3)$$

Onde:

V – Tensão média do processo

I – Corrente média do processo

v – Velocidade média de Soldagem

A velocidade média de soldagem foi obtida dividindo o comprimento do cordão depositado (l) pelo tempo de arco aberto (t) durante o processo. Tem-se na Equação 4 abaixo a fórmula para cálculo da velocidade média de soldagem.

$$v = \frac{l}{t} \quad (4)$$

3.3.1 Sistema de aquisição de corrente e tensão

Para maior certeza do cálculo da energia de soldagem do processo, utilizou-se o sistema de aquisição SAP V4 capaz de acompanhar e registrar os valores de corrente e tensão no momento da soldagem. A aquisição foi realizada com uma taxa de aquisição de 5.000 pontos por segundo. A Figura 3.7 mostra o equipamento SPA V4 utilizado.



FIGURA 3.7- Sistema SAP V4 utilizado para aquisição da corrente e tensão do processo.

Com o auxílio desse sistema é possível fazer o cálculo do aporte térmico para cada situação de soldagem, e assim conhecê-lo quando os melhores parâmetros de soldagem forem estipulados. A Figura 3.8 apresenta um oscilograma capturado com o sistema mencionado.

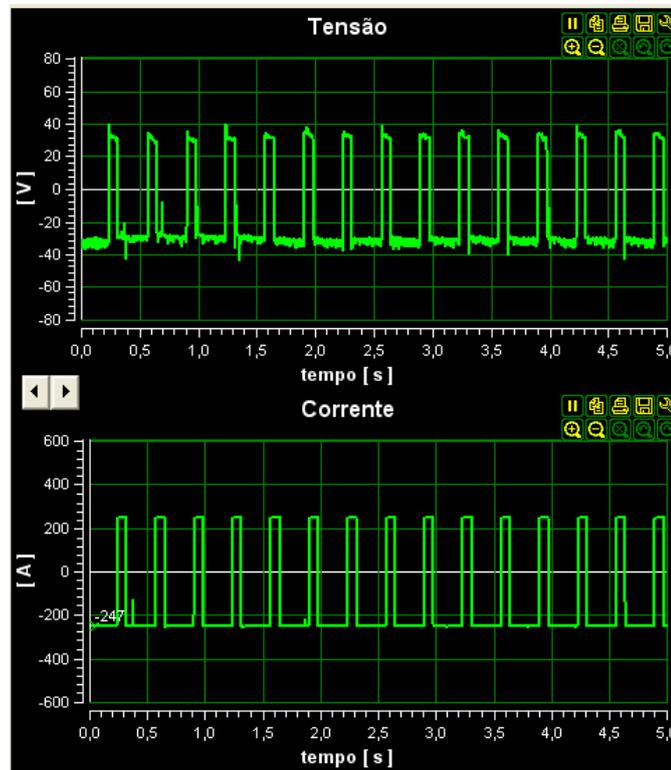


FIGURA 3.8– Interface do SAP V4 - Sistema de aquisição de sinais utilizado.

FONTE-<http://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/sap-v4>

3.4 Método de desbaste (esmerilhamento)

Uma das principais variáveis desse trabalho para estudar a melhora das qualidades das propriedades mecânicas de juntas soldadas submersas baseia-se no desbaste do reforço de cada cordão de solda logo após sua deposição, esse desbaste foi produzido por esmerilhamento controlado, deixando sempre 1 mm de reforço à cada passe de soldagem realizado.

O desbaste foi realizado com disco abrasivo de 1mm de espessura e refrigeração abundante. O controle da altura foi realizado com um paquímetro, que tinha como ponto de referência a superfície do chanfro, logo, media-se a profundidade até o topo do cordão, mantendo-se sempre 1mm de altura à cada passe de solda. A Figura 3.9 esquematiza o resultado do esmerilhamento e como foi realizado o controle de altura.

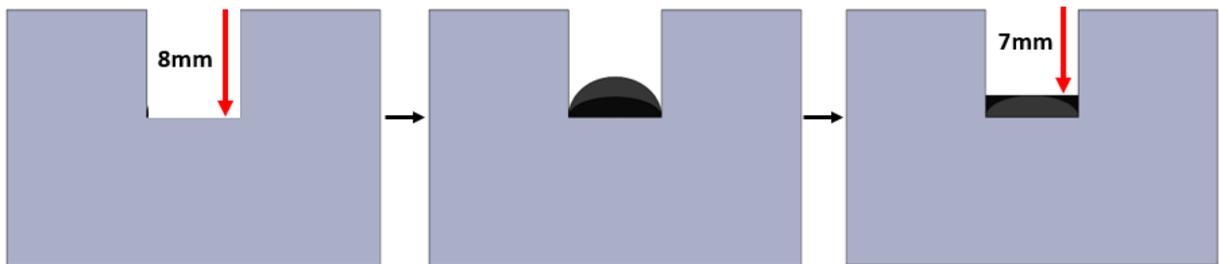


FIGURA 3.9- Esquema da seção transversal de um cordão depositado e a seção do mesmo cordão depois de sofrer o processo de esmerilhamento do reforço.

3.5 Método da inversão de sentido

A outra técnica estudada para verificar se provoca ou não melhora das propriedades mecânicas é o método da inversão no sentido de soldagem entre os passes subsequentes. Com esse método espera-se obter uma diferença no sentido de crescimento dos grãos colunares. Esse fenômeno se dá pois os grãos colunares presentes no centro do cordão de solda crescem seguindo isoterma e essas por sua vez tem o sentido concordante com o sentido de soldagem. A Figura 3.10 exemplifica esse método.

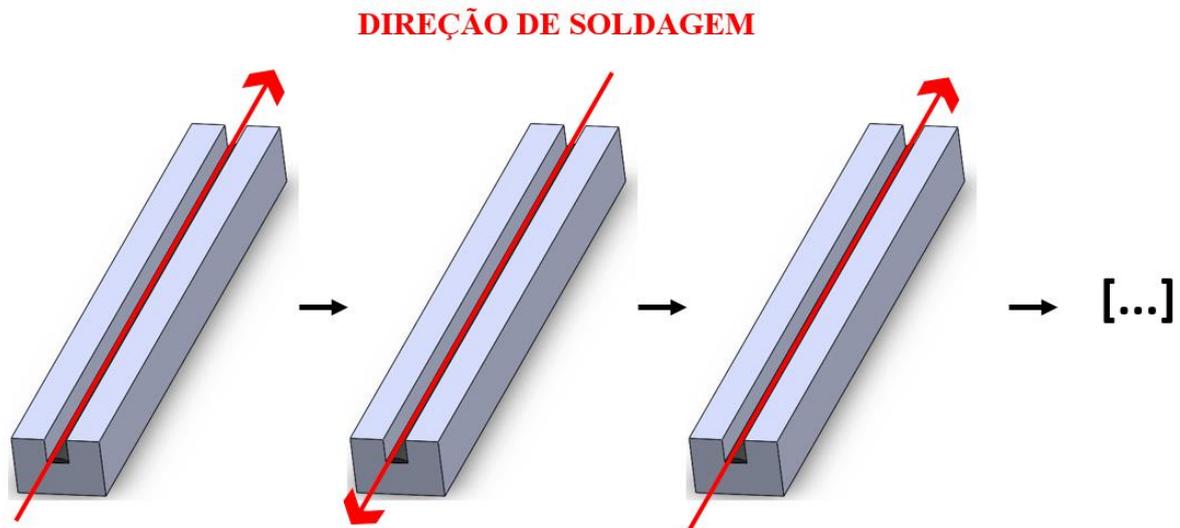


FIGURA 3.10- Método da inversão do sentido de soldagem.

A inversão do sentido de soldagem atua basicamente como um variador do ângulo de solidificação dos grãos colunares do metal de solda. Quando grãos colunares do passe subsequente tem seu sentido de crescimento alterado, a orientação granular do MS apresenta um “zigzague” visto longitudinalmente que dificulta a propagação de trincas e tende a aumentar a tenacidade e resistência mecânica do metal de solda.

O objetivo com a aplicação da técnica da inversão do sentido de soldagem a cada passe, visa mudar o sentido na orientação dos grãos colunares resultando em melhores propriedades do metal de solda.

Com a aplicação dessa técnica pretende-se também verificar se a mudança na direção de solidificação afeta o ciclo térmico entre os passes subsequentes na ZTA. Como explicado no item 2.4.4, a velocidade de solidificação no processo subaquático difere do processo a seco, assim sendo, a aplicação da técnica de inversão visa explorar uma possível mudança no fluxo de calor devido a alteração do sentido de soldagem, o que refletiria em possíveis alterações na formação e nas propriedades mecânicas da ZTA.

3.6 Corte da seção transversal por passe

A principal forma de análise das características da junta soldada e de suas propriedades mecânicas, neste trabalho, é através do ensaio de dureza e análise metalográfica da região soldada. Para fazer o estudo de como a junta se comporta à cada passe, desenvolveu-se nesse trabalho a metodologia de corte de uma seção do corpo de prova à cada cordão de solda

realizado no chanfro. A Figura 3.11 apresenta como é retirado a seção que será analisada do corpo de prova.

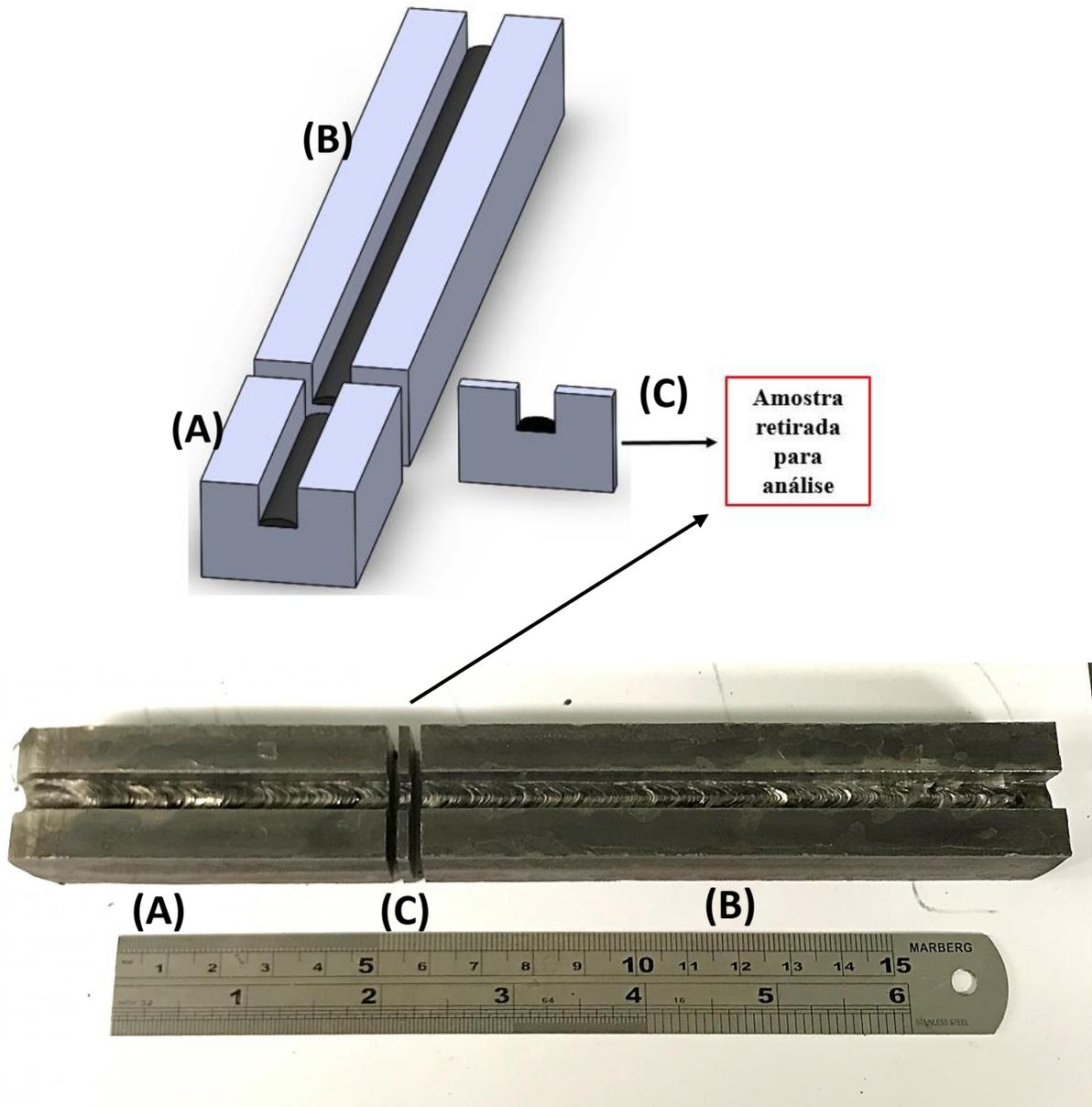


FIGURA 3.11- Corpo de prova cortado com destaque para a amostra retirada.

Após realizado um passe de solda e posteriormente ser retirado uma seção (C), as partes do corpo de prova de restaram (A e B) são novamente preparadas e reposicionadas mantendo o sentido original. Teve-se o cuidado de manter as faces paralelas entre si, eliminando um possível espaçamento entre os corpos de prova seccionados. A Figura 3.12 mostra esse processo de reposicionamento do corpo de prova.

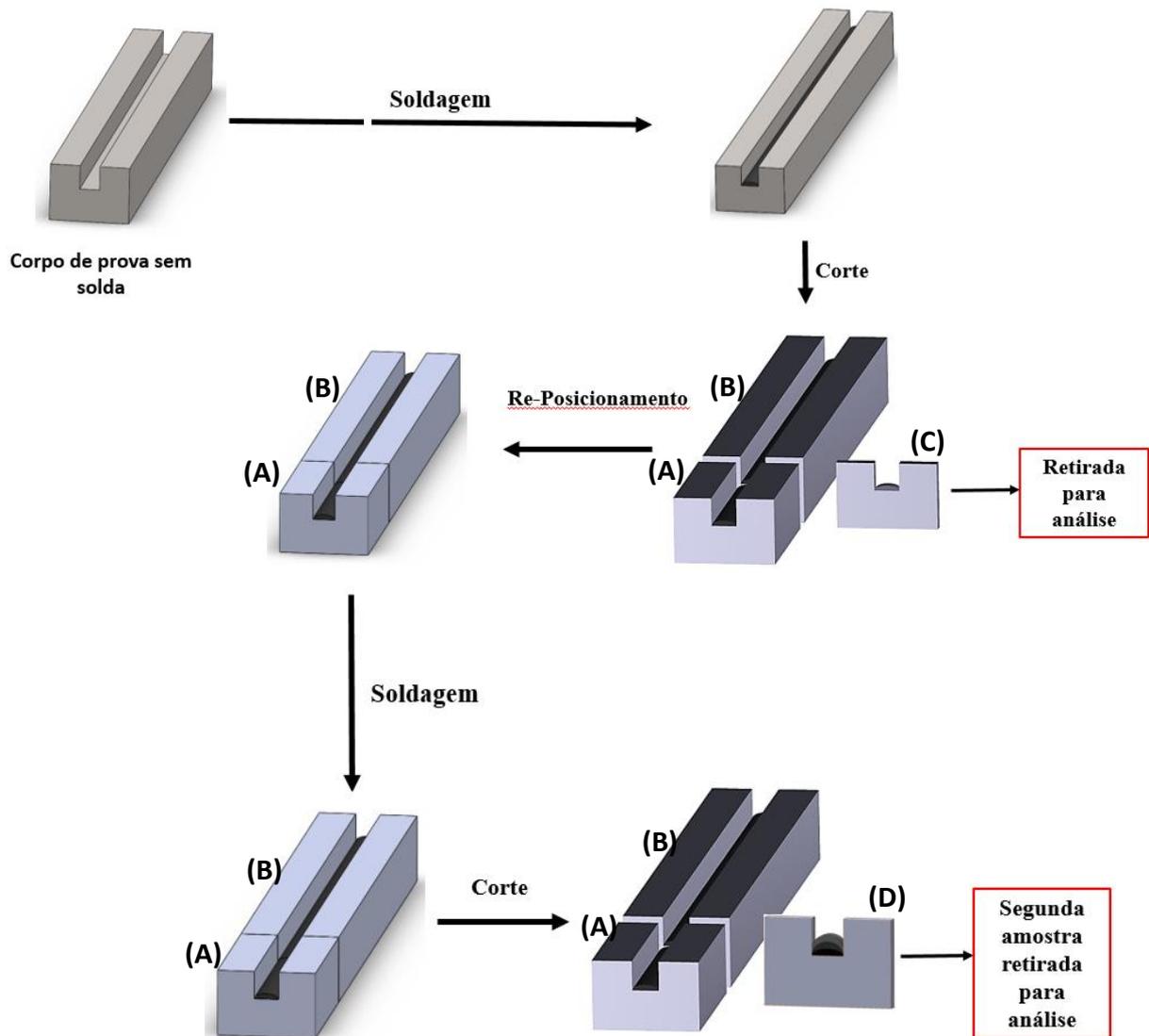


FIGURA 3.12 - Retirada da segunda seção transversal (D) da junta soldada. Nesse momento a seção possui 2 cordões depositados.

Com os corpos de prova (A e B) já repositados, é feito novamente um passe de solda no chanfro, realizado a soldagem retira-se novamente uma seção transversal da junta (D), imediatamente adjacente à região que foi retirada previamente (C).

Com o processo de Esmerilhamento

No caso dos corpos de prova que será utilizado o processo de esmerilhamento, uma nova etapa é inserida no ciclo de fabricação da junta. O corpo de prova passa por um processo de esmerilhamento, deixando apenas 1 mm de reforço do cordão depositado, como já discutido na metodologia, e só então após o processo de esmerilhamento os corpos de prova são reposicionados para ser realizado um novo passe de soldagem.

Na Figura 3.13 abaixo está apresentado o esquema de fabricação de um corpo de prova que sofre esmerilhamento.

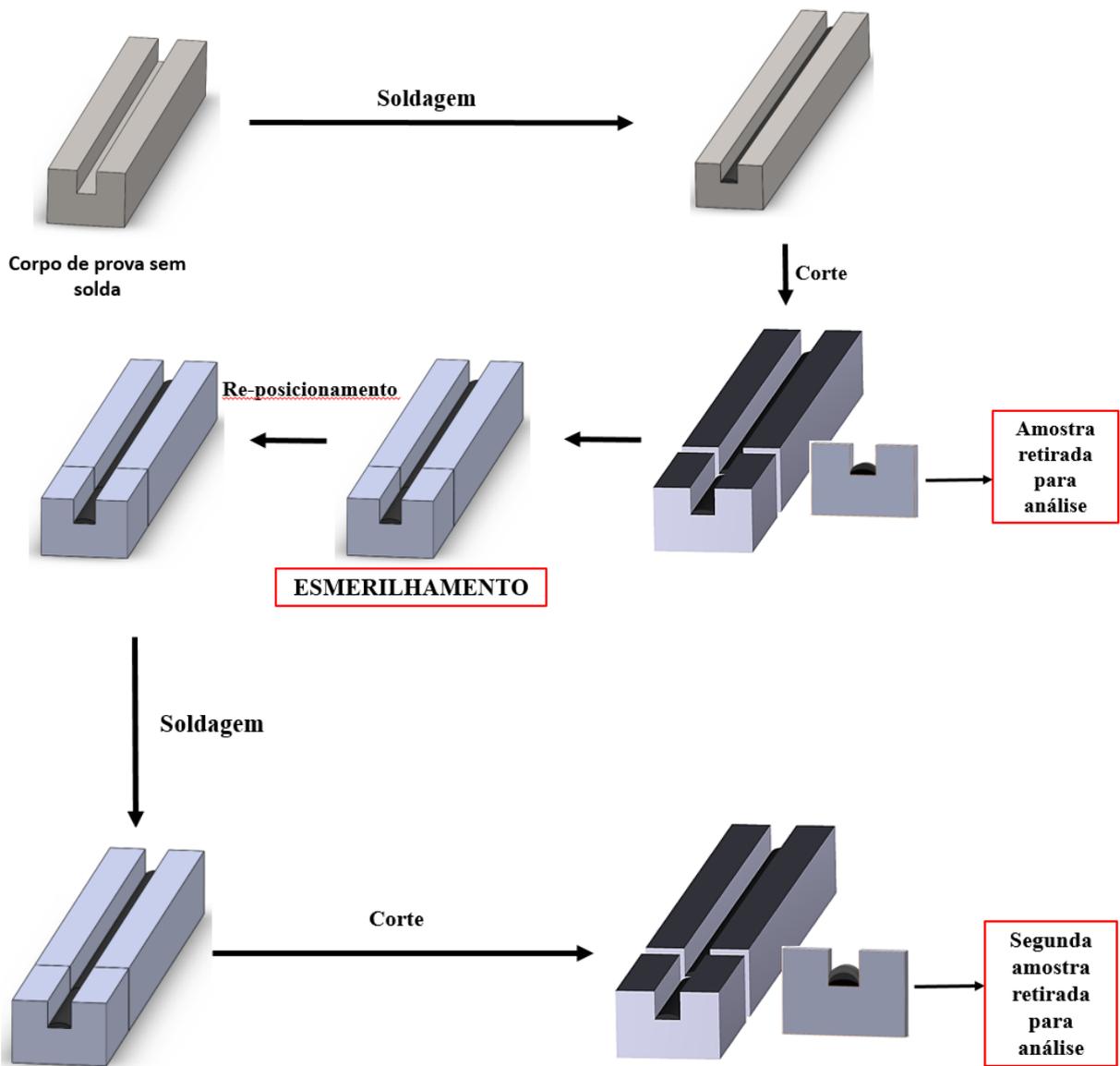


FIGURA 3.13- Esquema do passo-a-passo na soldagem do chanfro quando utilizado o processo de esmerilhamento.

Com o processo de inversão de sentido

No caso dos corpos de prova que será utilizado o processo de inversão de sentido o corpo de prova é rotacionado no reposicionamento de forma que o sentido de soldagem seja o contrário do sentido do passe imediatamente anterior, assim sendo, o final do cordão de um passe será o início do cordão no passe subsequente.

Na Figura 3.14 abaixo está apresentado o esquema de fabricação de um corpo de prova que sofre o processo de inversão no sentido de soldagem.

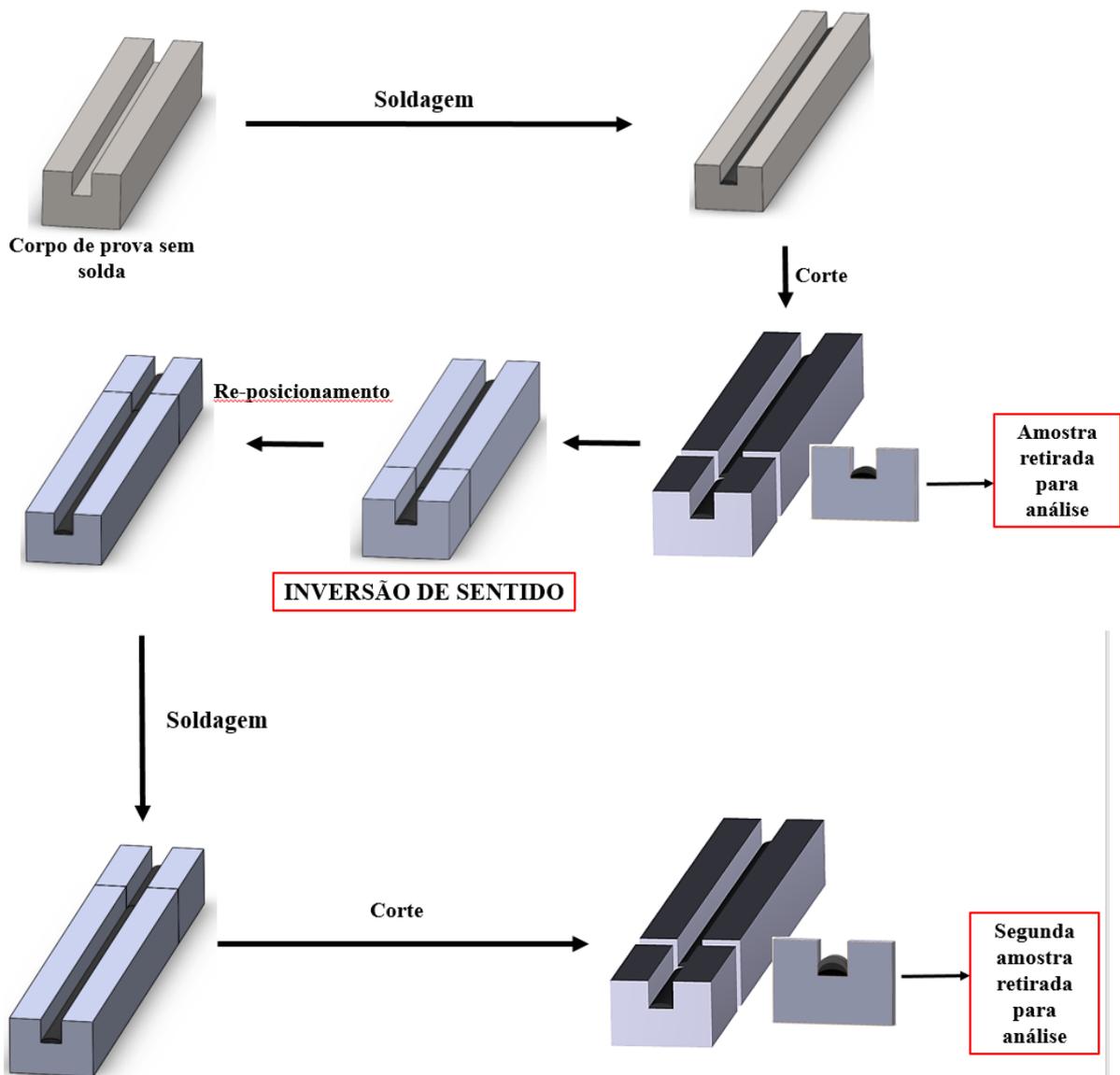


FIGURA 3.14- Esquema do passo-a-passo na soldagem do chanfro quando utilizado o processo de inversão do sentido de soldagem.

Na Figura 3.15 está apresentado o exemplo de um mesmo corpo de prova soldado neste trabalho utilizando o método de inversão de sentido. Nota-se a variação na direção das “escamas” produzidas pelo cordão. Este exemplo apresentado é de um corpo de prova já seccionado anteriormente para retirada de amostra como foi citado anteriormente no trabalho.

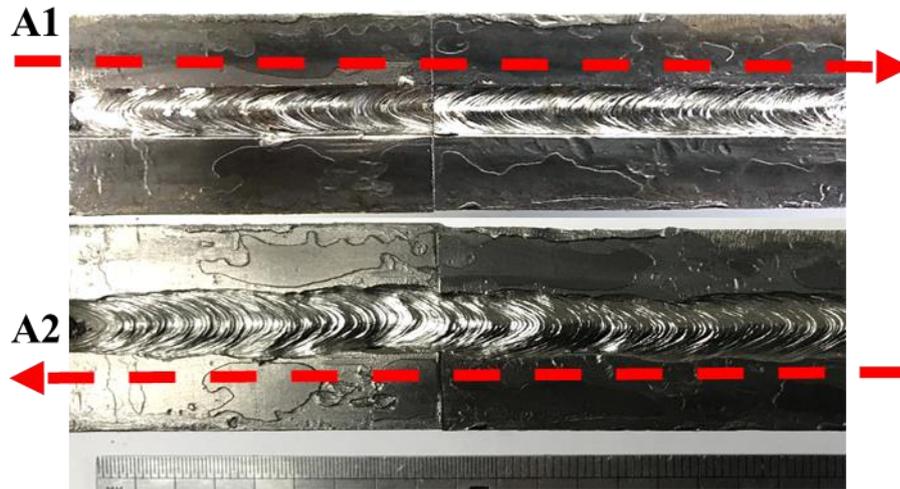


FIGURA 3.15– O mesmo chanfro soldado com processo de inversão de sentido. Na figura é apresentado o mesmo corpo de prova em cordões subsequentes (A1) e (A2).

FONTE – Autor.

3.5.1 Histórico da junta

Com a retirada de uma seção transversal à cada passe da região de soldagem tem-se uma espécie de “Histórico da Junta”, onde será estudada o comportamento mecânico de um mesmo ponto da ZTA à cada passe efetuado. Esse comportamento será avaliando utilizando o ensaio de microdureza que será explicado mais a frente.

Ao final da soldagem do chanfro tem-se várias “fatias” da região soldada, na Figura 3.16 são exemplificadas essas amostras.

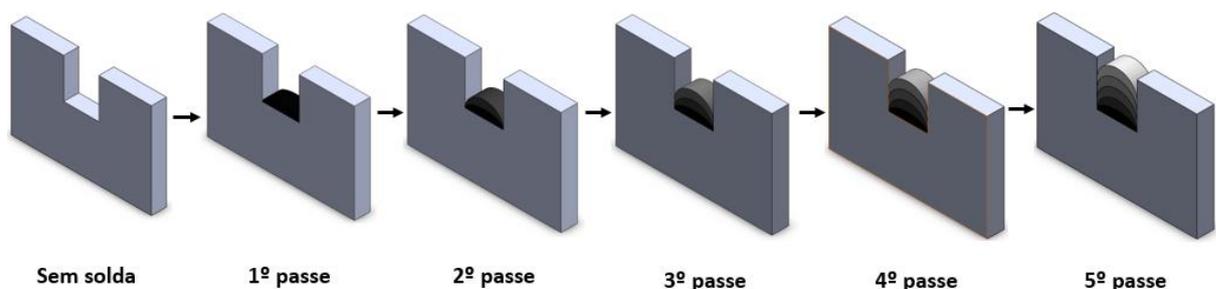


FIGURA 3.16 - Esquema das amostras das seções transversais dos corpos de prova.

3.6.1 Posicionador

Para que o procedimento mostrado anteriormente seja bem efetuado, é necessário garantir o posicionamento íntimo entre as partes a serem soldadas, para isso desenvolveu-se um dispositivo que impede a mobilidade das peças. As partes são colocadas sobre o dispositivo mostrado na Figura 3.17 e são então travadas. O dispositivo com as partes já montadas é colocado no tanque para ser efetuado cada passe de soldagem.

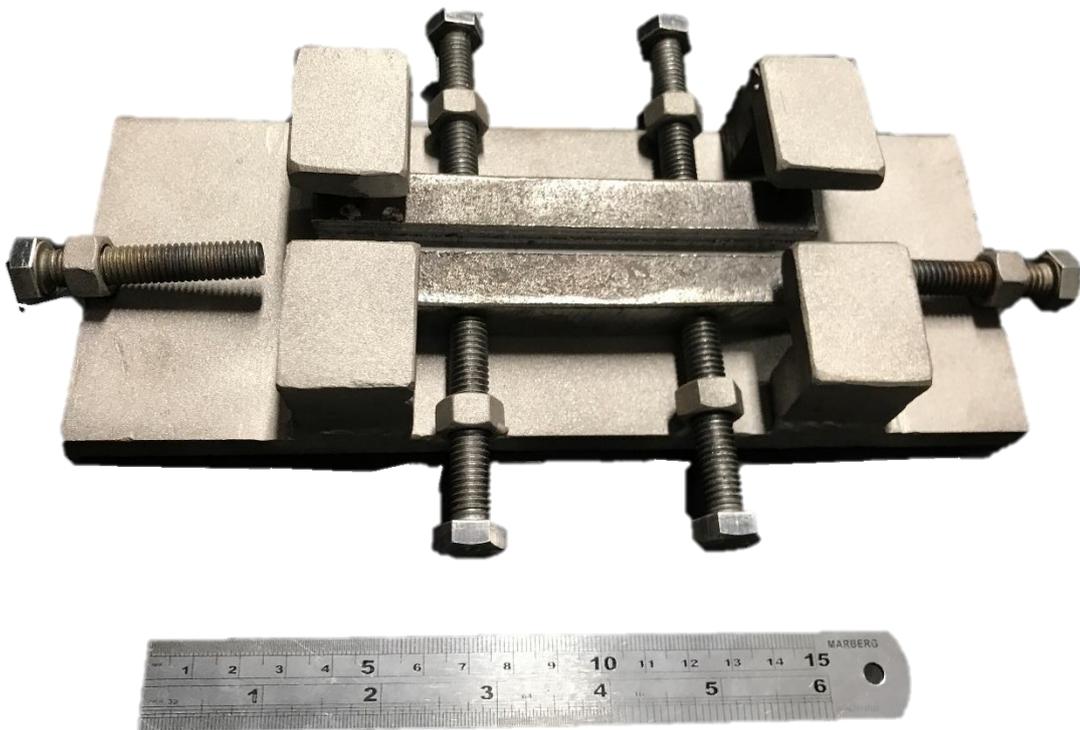


FIGURA 3.17- Posicionador dedicado para o corpo de prova utilizado neste trabalho. Garante o bom posicionamento e evita abertura entre as partes a serem soldadas.

3.7 Ensaio de microdureza Vickers

Os ensaios de microindentação foram realizados em um Microindentador Digital SHIMADZU HMV, com penetrador piramidal de diamante de 136° de conicidade. As medidas foram realizadas com a movimentação do corpo de prova sobre a bancada do aparelho, com observação por uma lente de ampliação de 40 vezes. Foi utilizada uma carga de 4,903 N, aplicada por 15 segundos. Na Figura 3.18 está apresenta a máquina, utilizada nesse ensaio.



FIGURA 3.18- Microidentador digital usado nos ensaios.

Para análise do perfil de dureza da região soldada, principalmente da ZTA, foi desenvolvida uma metodologia que se repete em todas as amostras analisadas. Foram feitas 42 identificações em cada amostra, sendo 21 em cada lado da junta e sempre nas regiões identificadas como sendo ZTA. As identificações foram feitas com uma separação de 0,5mm entre elas e 0,5mm de distância da Zona de Ligação, local onde começa a ZTA. A Figura 3.19 identifica essas regiões nas juntas soldadas.

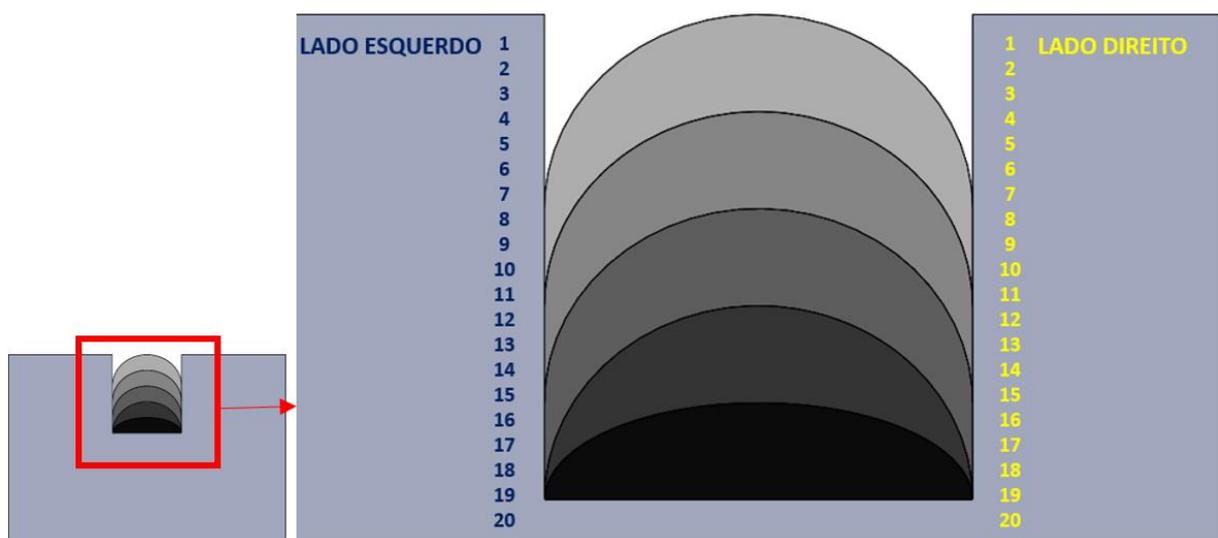


FIGURA 3.19- Esquema de um chanfro preenchido com 5 passes, com destaque para as regiões onde foram feitas as medidas de microdureza.

Esse perfil visa quantificar os valores de dureza ao longo da ZTA e identificar, principalmente, se houve regiões onde o revenimento não foi efetivo e suficiente para promover amaciamento do material.

3.8 Metalografia

Metalografias foram feitas com o principal intuito de avaliar a microestrutura resultante e qualificar a região ecrystalizada após preenchimento completo do chanfro.

Para análise da junta como um todo, desenvolveu-se uma metodologia de obtenção da imagem de toda região soldada a partir de imagens localizadas que permitem avaliar a microestrutura. Em outros termos, a macrografia utilizada para avaliar a região revenida foi obtida por várias micrografias. As micrografias foram realizadas no microscópio Olympus SZ-CTV e Olympus BX60M, com fotômetro e câmera de captura de imagem, apresentados na Figura 3.20. As imagens foram capturadas utilizando o software HLImage.



FIGURA 3.20 - Microscópio Olympus SZ-CTV e Olympus BX60M utilizado para realização das micrografias e macrografias.

3.8.1 Macrografia feitas por montagens de micrografias

Para montagem das micrografias, que possuem aumento de 25x, utilizou-se o programa Adobe Photoshop CS6, A Figura 3.21 apresenta uma comparação entre uma macrografia realizada de forma convencional, a partir de uma única foto, e a macrografia obtida pela metodologia utilizada neste trabalho.

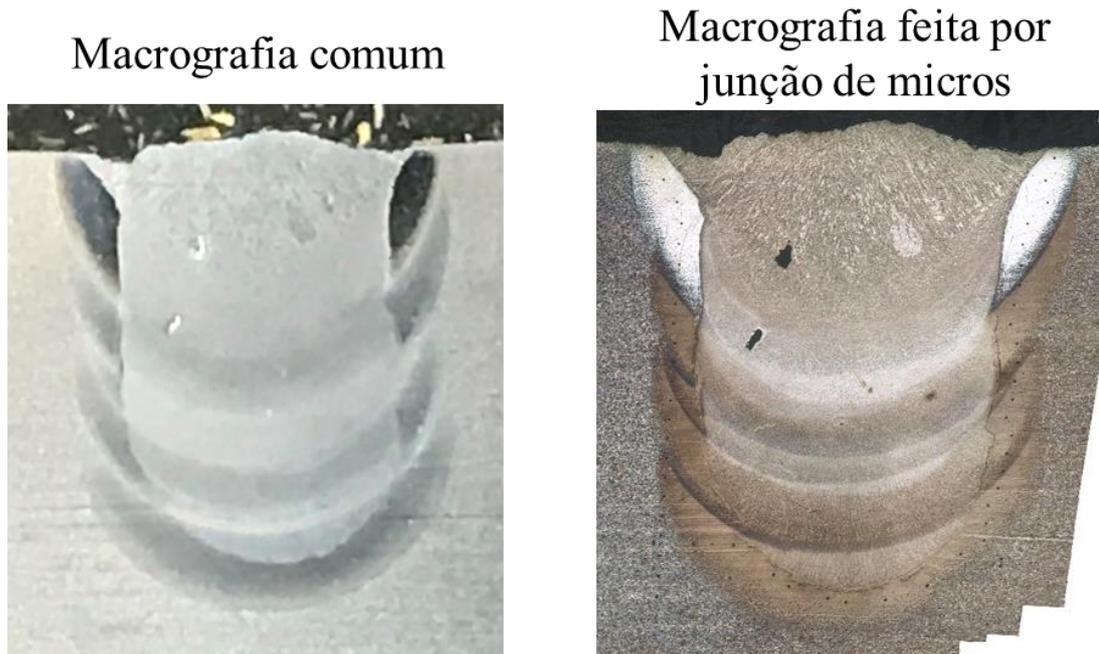


FIGURA 3.21 - Imagens de um mesmo corpo de prova. Uma feita por câmera de macrografia convencional, a outra feita por junção de diversas micrografias sequenciadas.

A Figura 3.22 apresentada abaixo é composta por mais de 100 micrografias com aumento de 25x.

Essa metodologia foi desenvolvida para permitir a análise da região de soldagem como um todo, sendo possível observar os grãos e as diferentes regiões na junta. Sua utilização será abordada e discutida no capítulo “Evolução da dureza”

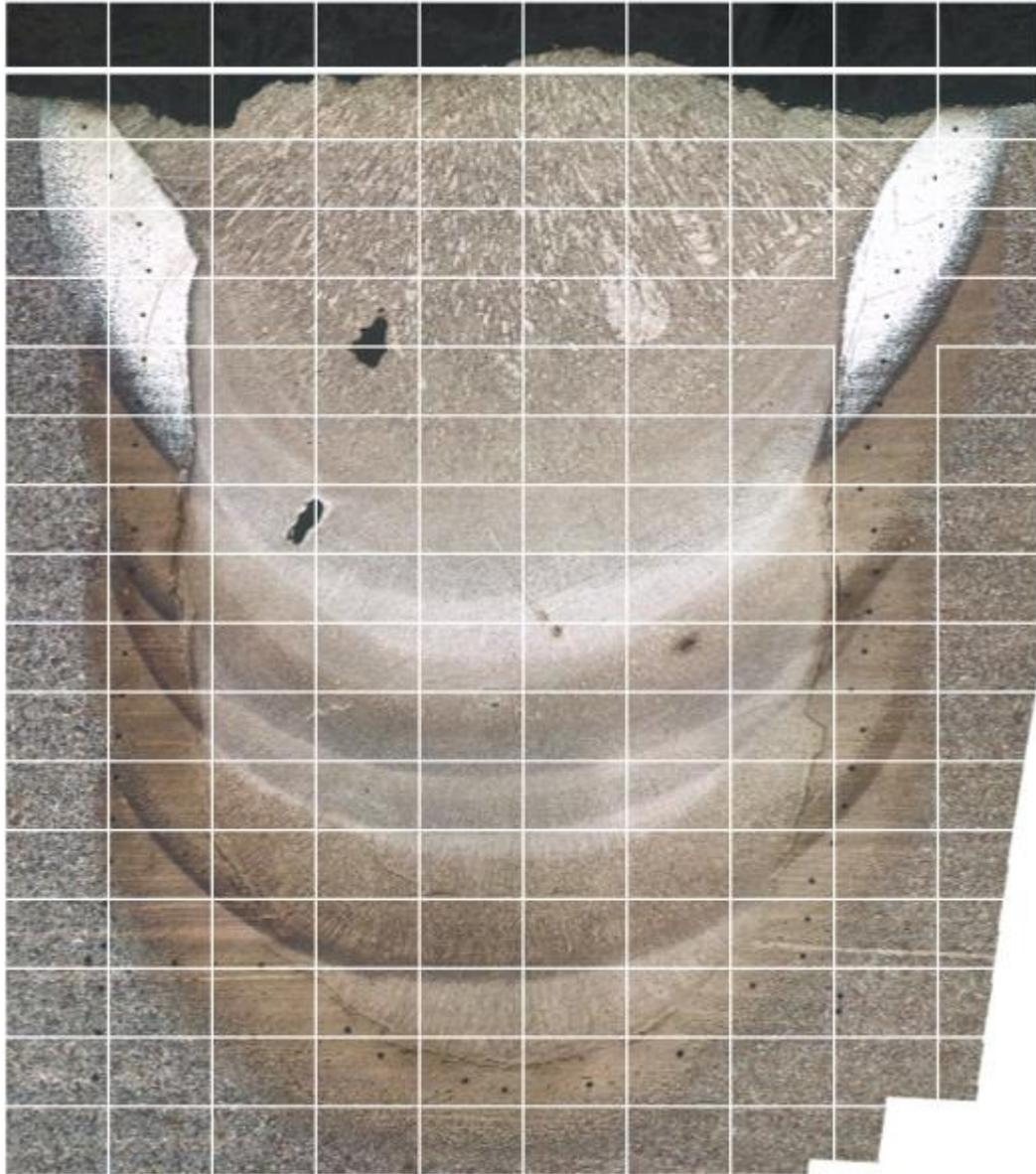


FIGURA 3.22 - Exemplificação de como a macrografia é montada a partir de micrografias.

3.8.2 Configurações de Soldagem utilizadas

Para estudo de cada técnica nas qualidades da junta serão estudadas 4 configurações de técnicas diferentes nos corpos de provas, são elas:

- Sem inversão e Sem esmerilhamento (S/I e S/E).
- Com inversão e Sem esmerilhamento (C/I e S/E).
- Sem inversão e Com esmerilhamento (S/I e C/E).
- Com inversão e Com esmerilhamento (C/I e C/E).

Para apresentação dos resultados para cada configuração os corpos de prova (CPs) serão numerados de 1 a 8 seguindo o critério adotado na Tabela 3.2 abaixo:

TABELA 3.2- Nomeclatura para os corpos de prova de acordo com a utilização ou não das técnicas estudadas.

Configuração	Número do CP
Sem inversão / Sem esmerilhamento	1 e 2
Com inversão / Sem esmerilhamento	3 e 4
Sem inversão / Com esmerilhamento	5 e 6
Com inversão / Com esmerilhamento	7 e 8

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados além dos resultados para os ensaios de dureza e o estudo das ZTAs para as 4 configurações utilizadas, os resultados preliminares da metodologia, como o cálculo da energia de soldagem utilizada.

4.1 Parâmetros de Soldagem

Para seleção dos melhores parâmetros de soldagem para o caso do metal de base SAE 1045 e eletrodo E6013, foram feitos 6 testes, variando a corrente e a velocidade de soldagem. Todos esses testes foram acompanhados pelo sistema de aquisição para cálculo posterior da energia de soldagem de cada caso.

Os valores comparados de corrente e velocidade de soldagem foram selecionados a partir de pesquisas internas já realizadas no LRSS. Na Tabela 4.1 estão apresentados os parâmetros que foram estudados.

TABELA 4.1 - Valores de corrente e velocidades de soldagem estudados antes da seleção da parametrização final.

Ângulo de Soldagem (°)	Corrente de Soldagem (A)
65	160
65	200
60	160
60	200
55	160
55	200

Com todos os cordões, nos diferentes padrões feitos, foi feita uma análise visual para verificar qual parametrização se adequaria ao trabalho. Na Figura 4.1 são apresentados os cordões feitos todos à 10m de profundidade.

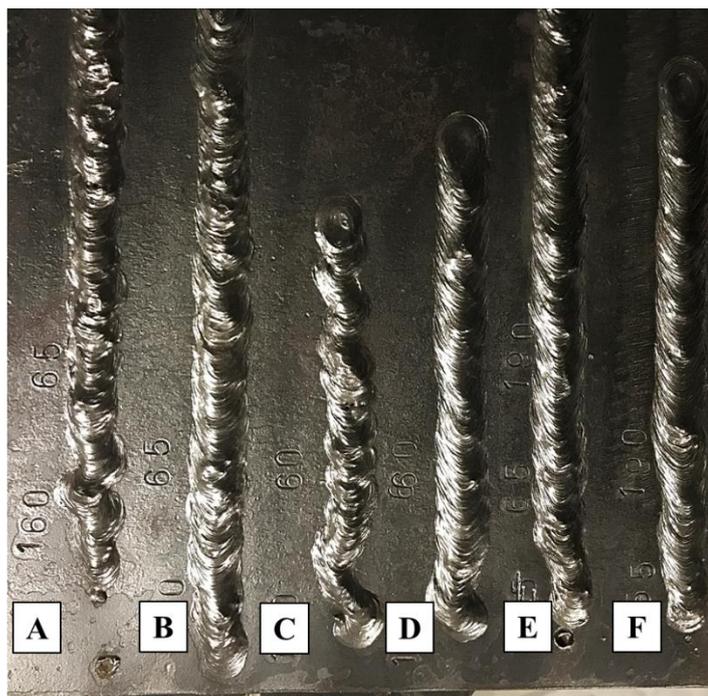


FIGURA 4.1 - Cordões realizados para escolha dos parâmetros. (A)65°/160A (B)65°/200A; (C)60°/160A; (D)60°/200A; (E)55°/160A; (F)55°/200A.

Após análise visual dos cordões depositados a parametrização utilizada foi de **60° e 200A**, cordão (D) na Figura 4.1.

4.2 Cálculo da energia de Soldagem do processo

Para cálculo da energia de soldagem do processo, que está ligado à formação e às características da ZTA, foram captados oscilogramas com os valores de tensão e corrente em tempo real durante os testes com uma taxa de 5000 pontos por segundo. Na Figura 4.2 abaixo estão apresentados os oscilogramas de tensão e corrente adquiridos com uma ângulo de soldagem de 60° e uma corrente de 200A.

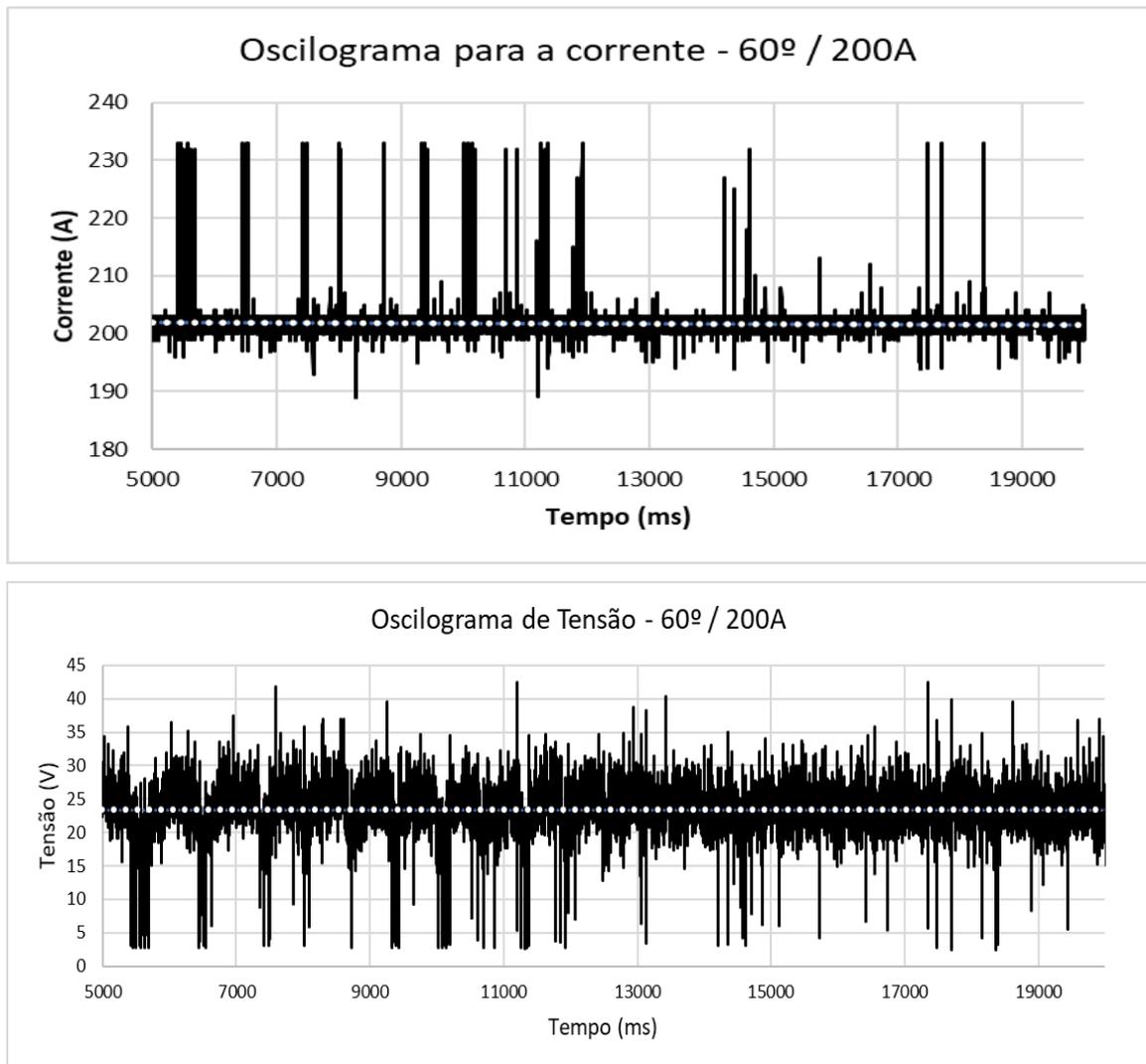


FIGURA 4.2 – Oscilogramas de Corrente d Soldagem e Tensão de soldagem. Parâmetros: 60° e 200A. Linha pontilhada mostrando a tendência da curva.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores dos parâmetros empregados e o resultado da energia de soldagem em função da velocidade com que a soldagem por gravidade foi realizada. Os valores de Tensão média e Corrente média foram adquiridos através do programa “Sinal” desenvolvido no LRSS.

TABELA 4.2 - Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem dos chanfros.

Ângulo de Soldagem (°)	Corrente de soldagem média (A)	Tensão Média (V)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
60	202	23,7	3,88	1,23

4.3 Macrografias dos chanfros soldados

As macrografias convencionais dos chanfros soldados são apresentados nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, respeitando a nomenclatura adotada presente na Tabela 3.2.

Sem inversão / Sem esmerilhamento – CP 1 e CP 2

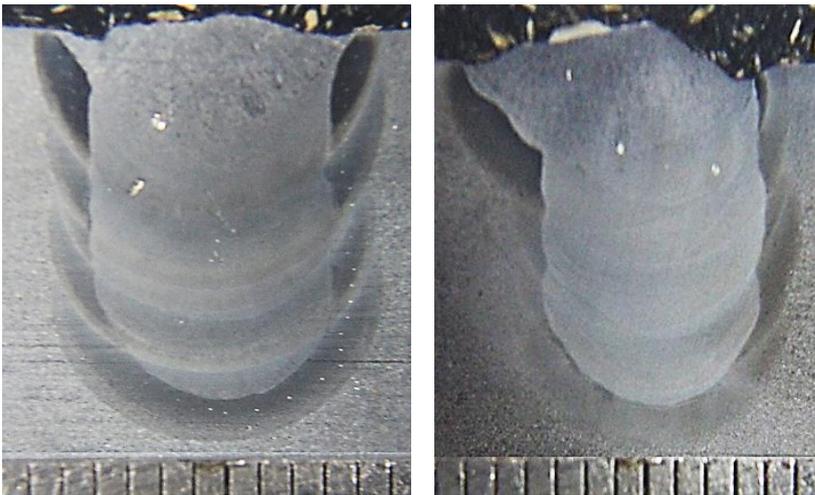


FIGURA 4.3 - Macrografias CP 1 e CP 2 - Configuração: Sem inversão / Sem esmerilhamento

Com inversão / Sem esmerilhamento – CP 3 e CP 4

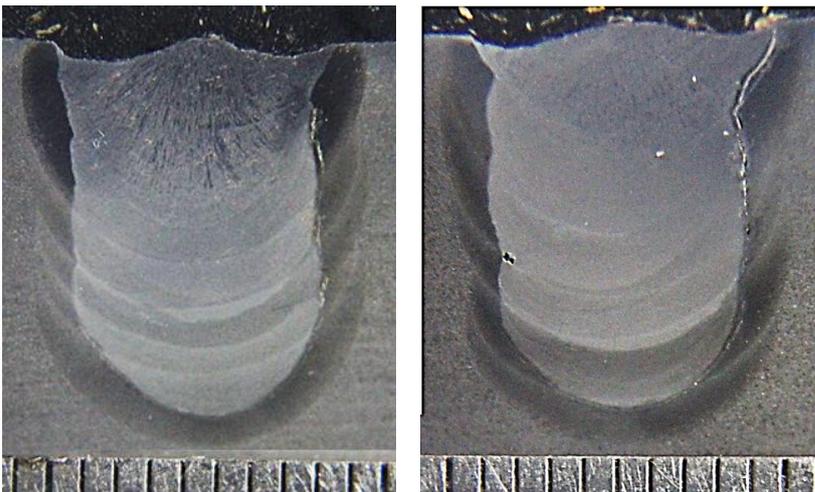


FIGURA 4.4 - Macrografias CP 3 e CP 4 - Configuração: Com inversão / Sem esmerilhamento

Sem inversão / Com esmerilhamento – CP 5 e CP 6

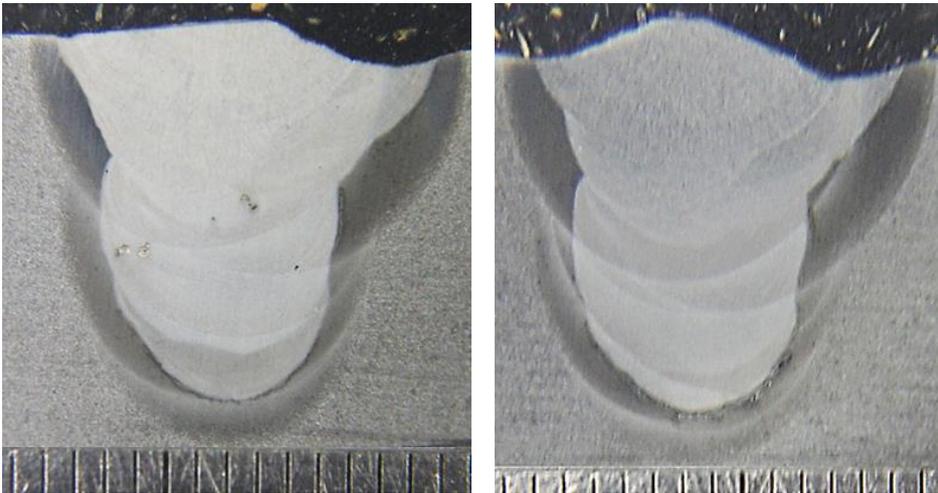


FIGURA 4.5 - Macrografias CP 5 e CP 6 - Configuração: Sem inversão / Com esmerilhamento.

Com inversão / Com esmerilhamento – CP 7 e CP 8

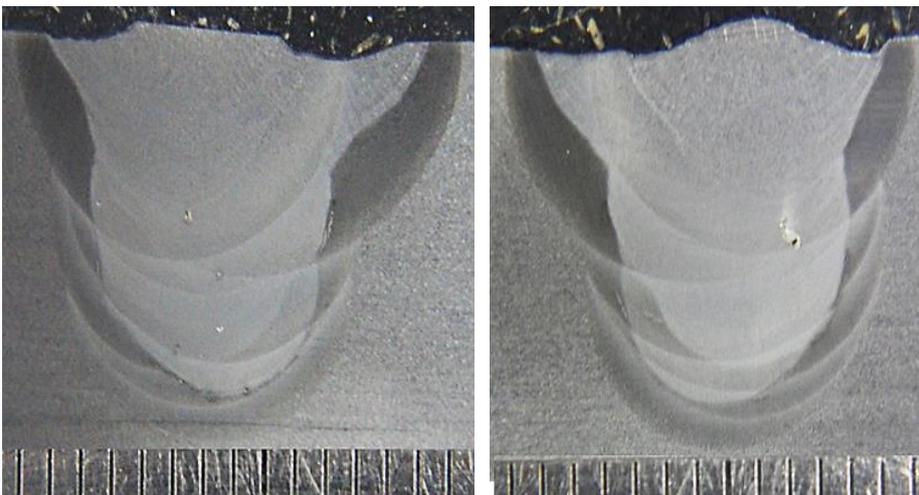


FIGURA 4.6 - Macrografias CP 7 e CP 8 - Configuração: Com inversão / Com esmerilhamento.

4.4 Resultados para o ensaio de dureza

Os resultados para o ensaio de dureza do chanfro preenchido estão apresentados nos gráficos abaixo (figuras 4.8 à 4.15), neles são apresentados os valores de dureza para cada lado da região de soldagem. Para comparação com o valor de referência estipulado pela norma AWS D3.6 tem-se a linha de referência em vermelho, indicando 325 vickers. A Figura 4.7

apresenta as regiões de identações para o ensaio de dureza, essa macrografia especificamente do CP1.

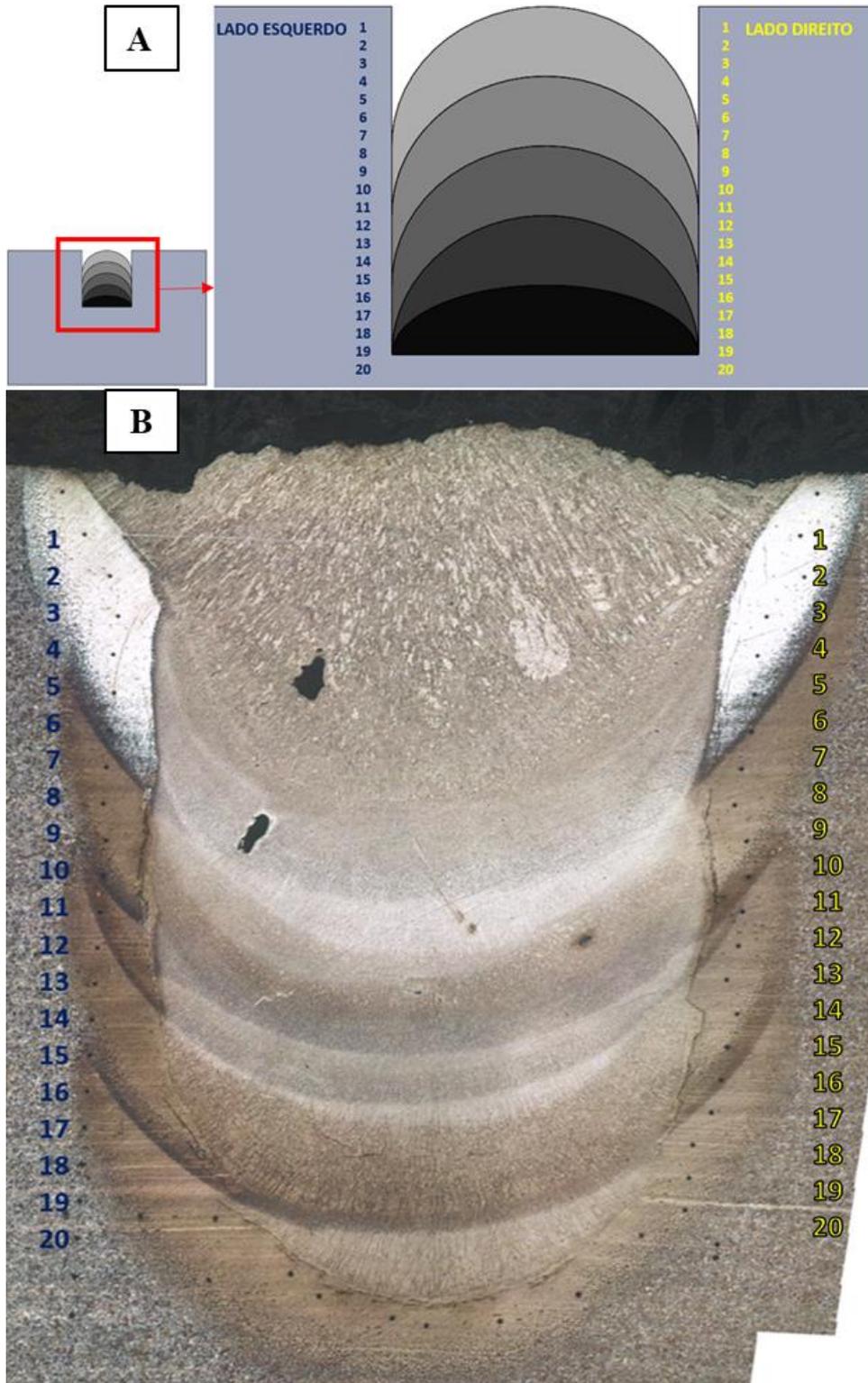


FIGURA 4.7- Posições das identações seguindo a metodologia. Em (A) tem-se esquema do chanfro soldado com as posições das identações; Em (B) é possível visualizar as identações feitas no corpo de prova (CP1) soldado.

4.4.1 Sem Inversão / Sem Esmerilhamento

Os resultados das medições de dureza para os Corpos de prova 1 e 2, que não foram sujeitos à técnica de inversão de sentido nem de esmerilhamento são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9. Recapitulando que as posições, em cada um dos lados, são apresentadas de 1 a 21, sendo a sua distribuição começando da superfície do chanfro (1) em direção ao seu interior (21), sempre seguindo a ZTA. Nas Figuras 4.8 e 4.9 são apresentados o perfil de dureza da ZTA para os corpos de prova 1 e 2, neles nenhuma técnica foi aplicada.

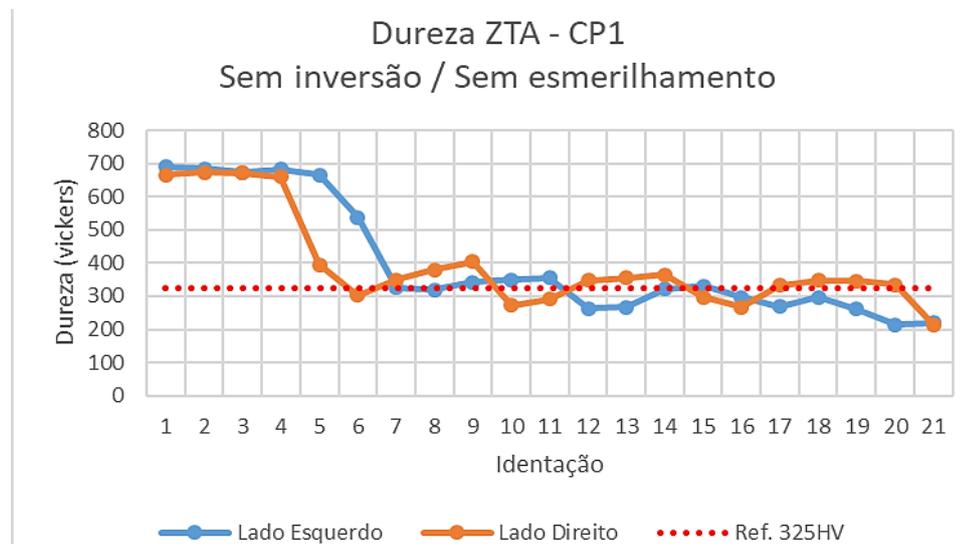


FIGURA 4.8 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP1 soldado sem inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

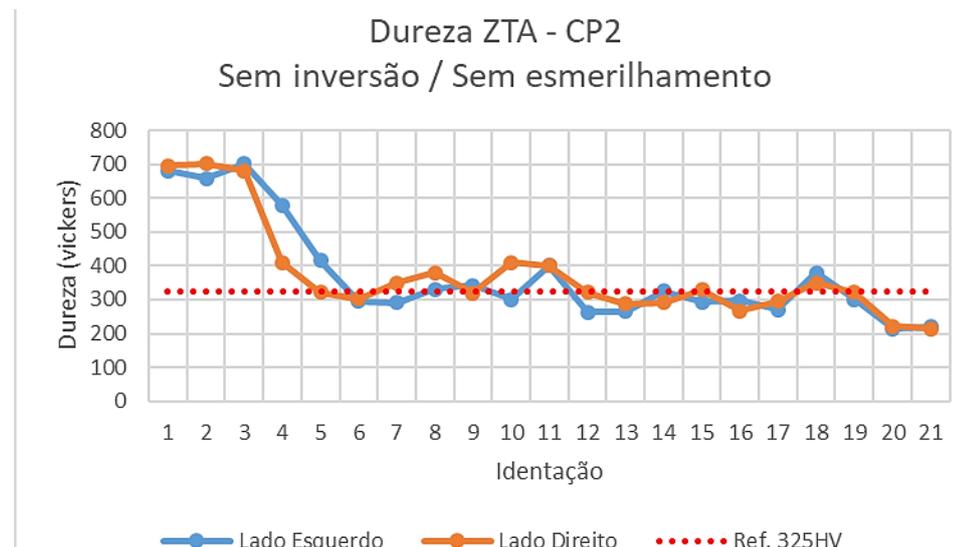


FIGURA 4.9 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP2 soldado sem inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

Nota-se para os diagramas apresentados alguns valores de dureza acima da norma estabelecida e adotada como referência neste trabalho. As principais regiões que apresentam esses valores são as regiões superficiais, o que é esperado pois o último passe não sofre um possível revenimento de um passe seguinte.

Porém há outros valores acima do estipulado, e esses se encontram em posições internas no chanfro soldado eles estão listados na Tabela 4.3 a seguir:

TABELA 4.3 - Regiões internas com dureza acima de 325HV para os CP 1 e CP 2.

Regiões internas de dureza excessiva (Acima de 325HV)		
	Lado esquerdo	Lado direito
CP 1	9; 10; 11; 15	7; 8; 9; 12; 13; 14; 17; 18; 19; 20
CP 2	8; 9; 14; 18	7; 8; 10; 11; 15; 18; 19

Um subcapítulo mais a frente discutirá esses picos, que estão presentes nas duas amostras de mesma configuração.

4.4.2 Com Inversão / Sem Esmerilhamento

Abaixo são apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11 os diagramas com os resultados de dureza para os CPs 3 e 4, nessa configuração os passes da junta são submetidos à inversão no sentido de soldagem, porém não são submetidos ao método do esmerilhamento.

Essa configuração é importante pois resultados diferentes dos apresentados no CP 1 e 2, vão indicar como o método de inversão de sentido influencia nos valores de dureza da ZTA formada.

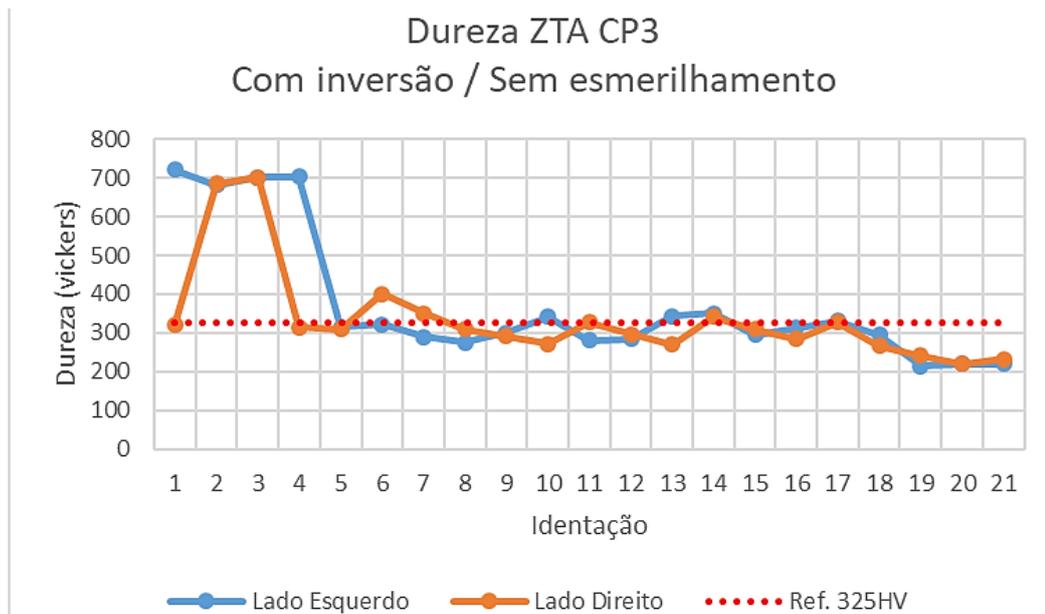


FIGURA 4.10 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP3 soldado com inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

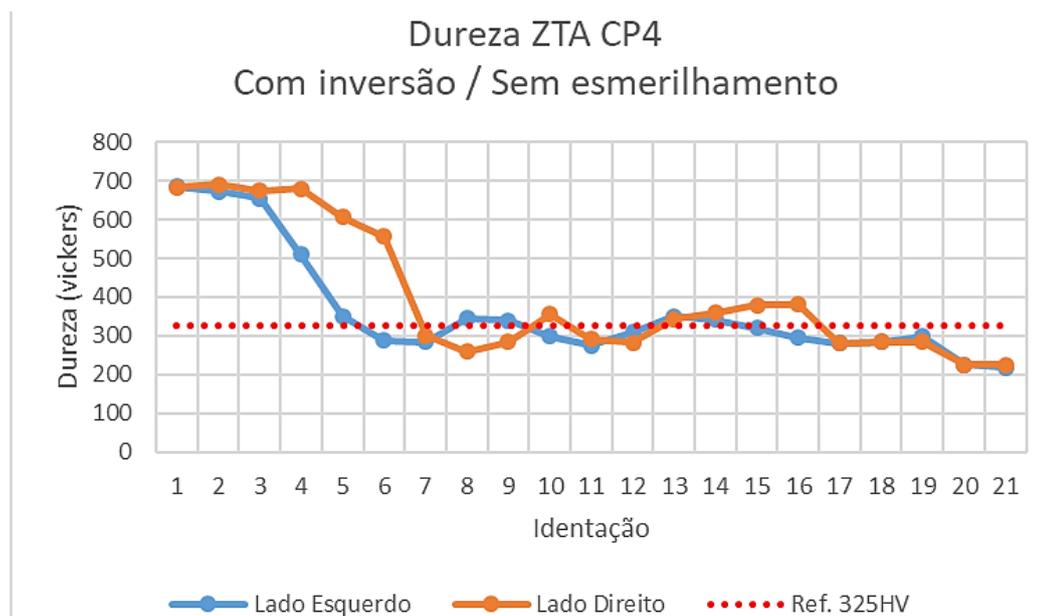


FIGURA 4.11 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP4 soldado com inversão de sentido e sem esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

Nos dois CPs onde se utiliza a técnica de inversão de sentido e não utiliza a técnica de esmerilhamento são notados pontos de dureza excessiva na superfície e em regiões internas do chanfro. A Tabela 4.4 abaixo apresenta as identificações onde as regiões internas do chanfro apresentaram dureza acima de 325 HV.

TABELA 4.4 - Regiões internas com dureza acima de 325HV para os CP 3 e CP 4.

Regiões internas de dureza excessiva (Acima de 325HV)		
	Lado esquerdo	Lado direito
CP 3	10; 13; 14; 17	6; 7; 11; 14; 15; 17
CP 4	8; 9; 13; 14;	10; 13; 14; 15; 16

4.4.3 Sem Inversão / Com Esmerilhamento

Os CPs 5 e 6 passaram pelo processo de esmerilhamento, porém foi mantido o sentido de soldagem em todos os passes, sendo assim, a comparação dessas juntas com os CPs 1 e 2 irá indicar de que forma o processo de esmerilhamento influencia nas propriedades da junta soldada.

Abaixo são apresentadas as Figuras 4.12 e 4.13 com os diagramas de dureza para os chanfros CP5 e CP6, neles foram feitos 7 passes. A quantidade de cordões de solda quando se tem o processo de esmerilhamento é maior devido à retirada de material a cada passe.

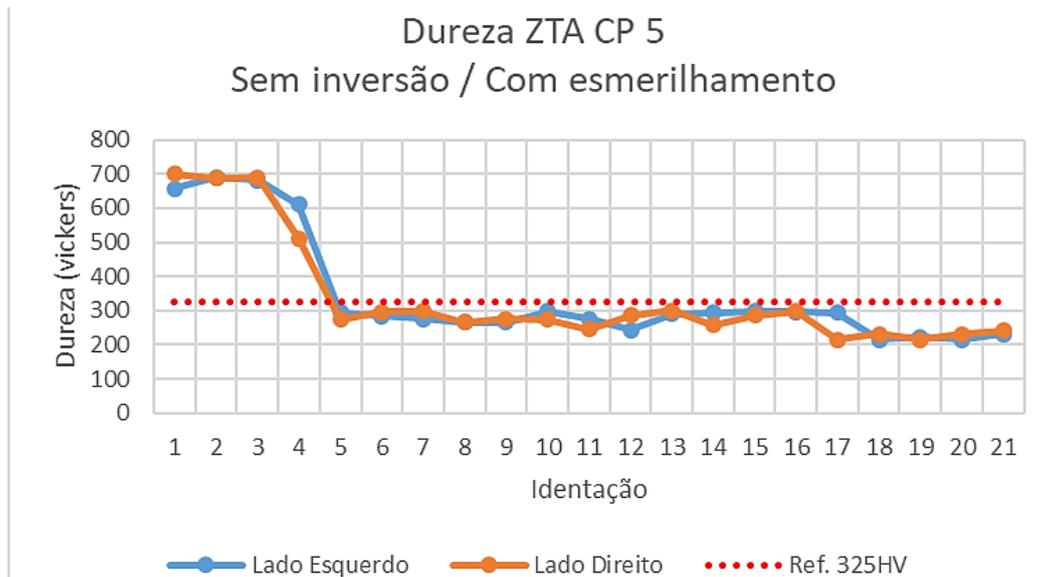


FIGURA 4.12 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP5 soldado sem inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

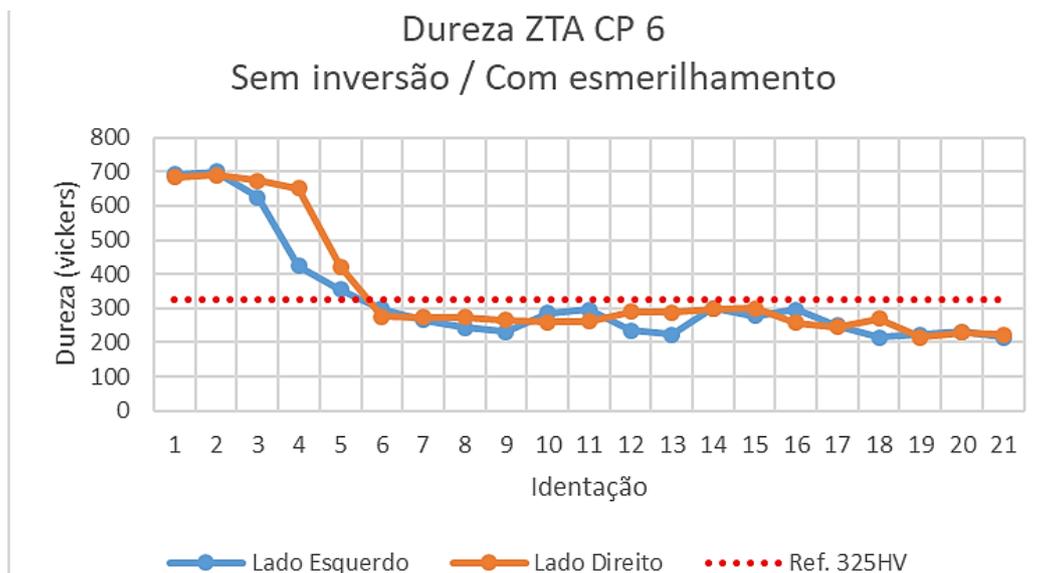


FIGURA 4.13 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP6 soldado sem inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

Nota-se para esses corpos de prova a ausência de regiões de dureza excessiva no interior do chanfro, observa-se uma maior homogeneidade de valores para a ZTA de regiões internas da junta soldada e esses valores permanecem abaixo do valor estipulado como máximo pela norma que é de 325HV.

Apesar de não apresentar regiões de dureza excessiva no interior do chanfro, a região superficial da ZTA apresenta valores da ordem de 600HV.

A Tabela 4.5 abaixo segue a mesma metodologia das tabelas apresentadas para os CPs 1, 2, 3 e 4, porém como não foram registrados regiões de dureza excessiva a tabela não apresenta nenhuma identificação.

TABELA 4.5 - Para os CPs 5 e 6 não houve região interna com dureza acima de 325HV.

	Regiões internas de dureza excessiva (Acima de 325HV)	
	Lado esquerdo	Lado direito
CP 5	N/A	N/A
CP 6	N/A	N/A

4.4.4 Com Inversão / Com Esmerilhamento

A quarta configuração utilizada nesse trabalho foi trabalhando com a técnica de inversão de sentido e esmerilhamento simultaneamente, ou seja, nos CPs 7 e 8 os chanfros foram submetidos às duas técnicas estudadas.

Dessa forma:

- Se comparado com os CPs 3 e 4, será avaliado o papel do esmerilhamento nas propriedades da junta.
- Se comparado com os CPs 5 e 6 será avaliado o papel da inversão de sentido nas propriedades das juntas.

Abaixo são apresentadas as Figuras 4.14 e 4.15 com os diagramas com os resultados de dureza para os CPs 7 e 8 que foram submetidos às técnicas de inversão de sentido e esmerilhamento.

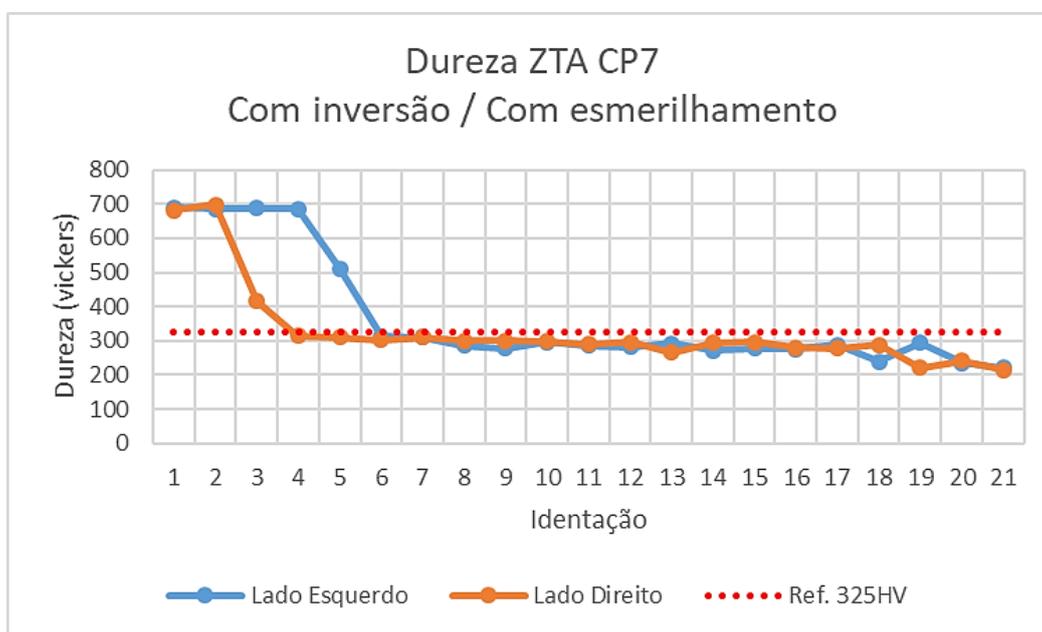


FIGURA 4.14 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP 7 soldado com inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

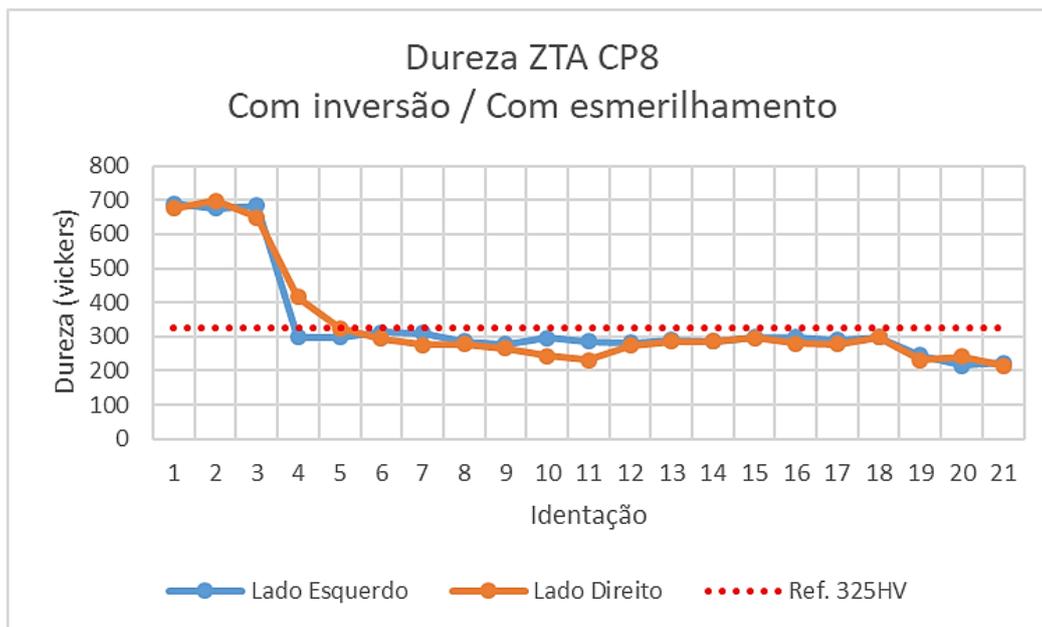


FIGURA 4.15 - Perfil de dureza da ZTA para as laterais do corpo de prova CP 8 soldado com inversão de sentido e com esmerilhamento. Identação 1 - topo do chanfro; Identação 21 - MB.

Nos diagramas acima é possível notar que os CPs 7 e 8 também apresentam dureza excessiva nas regiões superficiais da ZTA, porém, como nos CPs 5 e 6 eles não apresentam dureza acima de 325HV nas regiões internas das juntas soldadas.

A Tabela 4.6 abaixo segue o método de apresentação de regiões internas que apresentaram dureza excessiva para os CPs 7 e 8

TABELA 4.6 - Para os CPs 7 e 8 não houve região interna com dureza acima de 325HV.

	Regiões internas de dureza excessiva (Acima de 325HV)	
	Lado esquerdo	Lado direito
CP 7	N/A	N/A
CP 8	N/A	N/A

4.4.5 Resultado Geral

Para melhor compreensão e leitura dos diagramas, podemos separar os resultados em 2 tipos, os que apresentam durezas elevadas no interior da ZTA e os que não apresentam esses valores acima da norma, com isso tem-se a Tabela 4.7:

TABELA 4.7 - Resultados da presença ou não de regiões excessivamente duras no interior dos chanfros de acordo com as técnicas utilizadas.

Configuração			Resultados	
CPS	Invertendo	Esmerilhando	Dureza Excessiva em regiões internas	Dureza excessiva na região superficial
1 e 2				
3 e 4	SIM			
5 e 6		SIM		
7 e 8	SIM	SIM		

Apresentou
 Não apresentou

Percebe-se que os corpos de prova que sofreram o processo de esmerilhamento não apresentaram dureza excessiva em regiões internas da ZTA, porém todas as amostras apresentam dureza excessivas nas regiões da ZTA junto da superfície.

Assim sendo, tem-se que o método de esmerilhamento evita que valores de dureza acima dos que são considerados ideais pela norma fossem detectados em regiões internas das amostras em que esse procedimento foi adotado, porém, como esperado, não influenciou nas regiões mais superficiais da ZTA, que continuaram apresentando dureza elevada.

4.5 “Evolução da dureza”

Para melhor compreensão de como a dureza se comporta nos chanfros em que não houve esmerilhamento, buscando investigar o porquê dos picos de elevada dureza em regiões internas da ZTA, foram realizadas as durezas em cada passe de solda.

As “fatias” retiradas à cada passe foram submetidas à metodologia apresentada em que são feitas macros a partir de micros. O corpo de prova selecionado foi o corpo de prova 1 (CP1) e cada fatia é apresentada abaixo, sendo possível observar os grãos e as diferentes regiões da ZTA.

As Figura 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam as macrografias feitas a partir de micrografias. Nas fatias foram realizados os ensaios de dureza seguindo a mesma metodologia já apresentada. Os resultados de dureza serão apresentados a seguir.

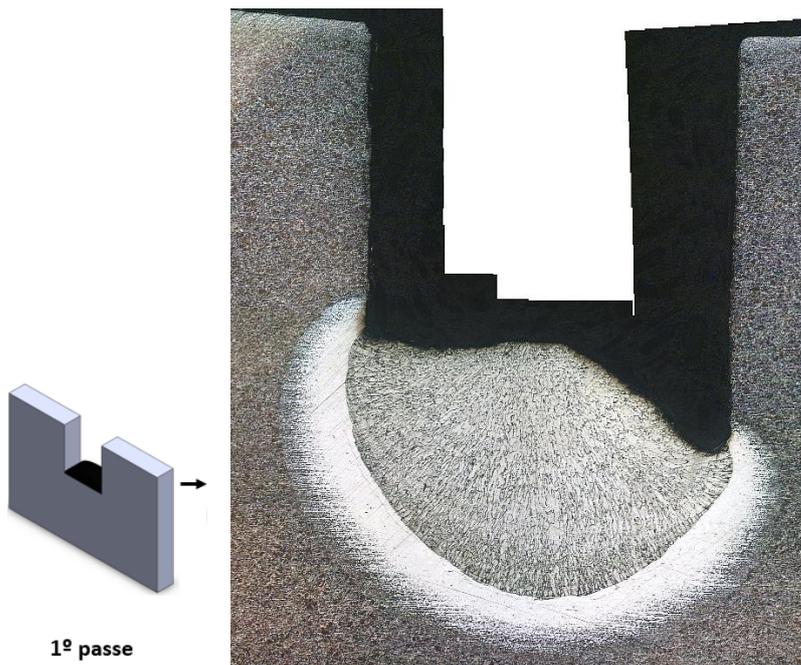


FIGURA 4.16 - Esquema da deposição do 1º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.

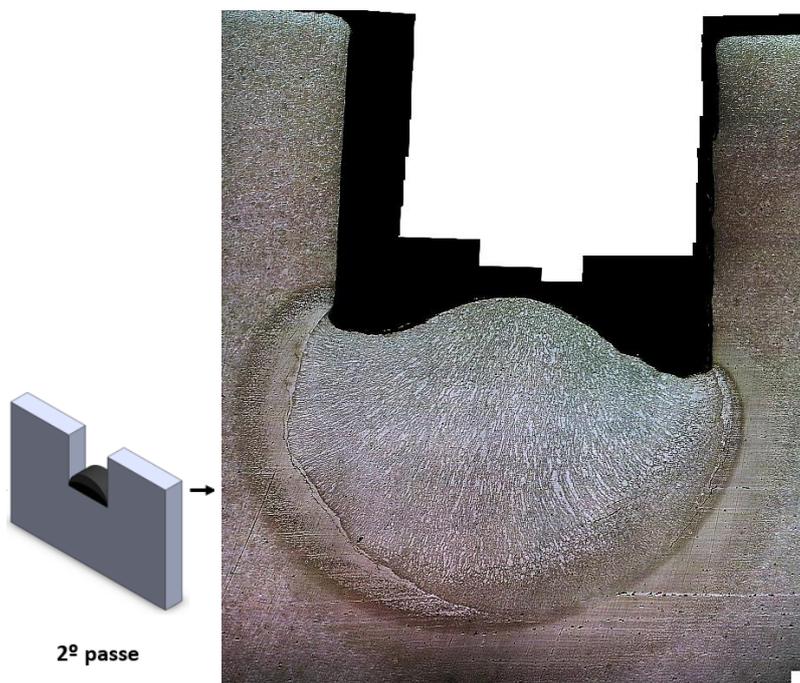


FIGURA 4.17- Esquema da deposição do 2º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.

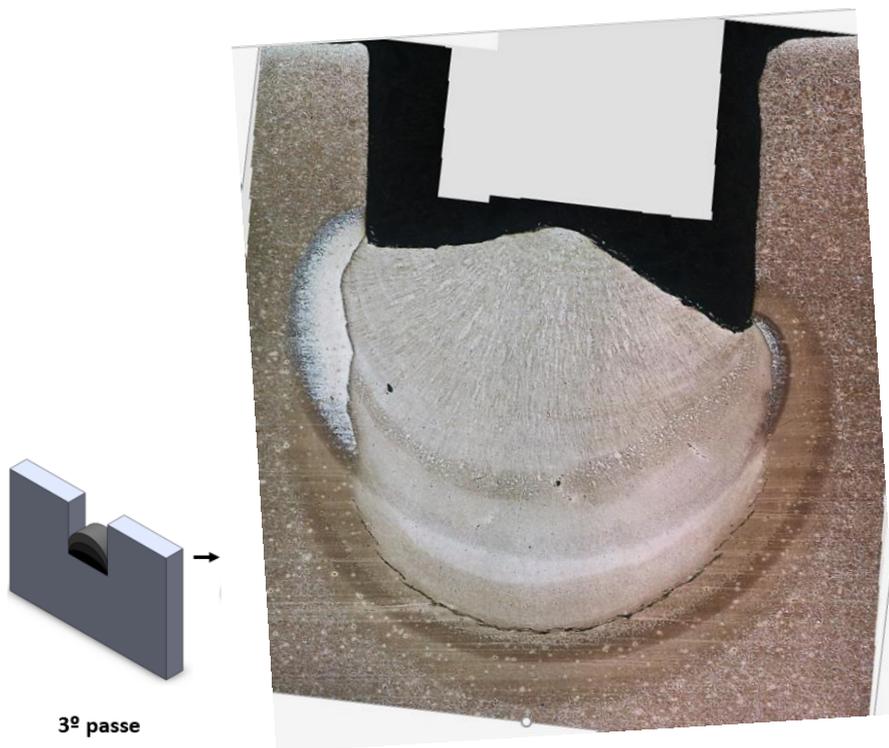


FIGURA 4.18- Esquema da deposição do 3º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.

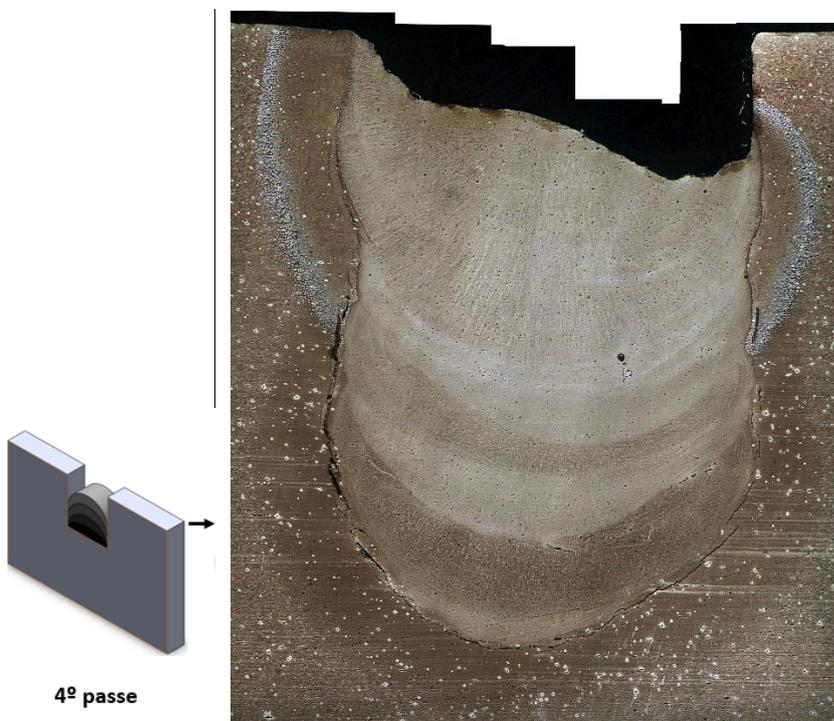


FIGURA 4.19- Esquema da deposição do 4º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.

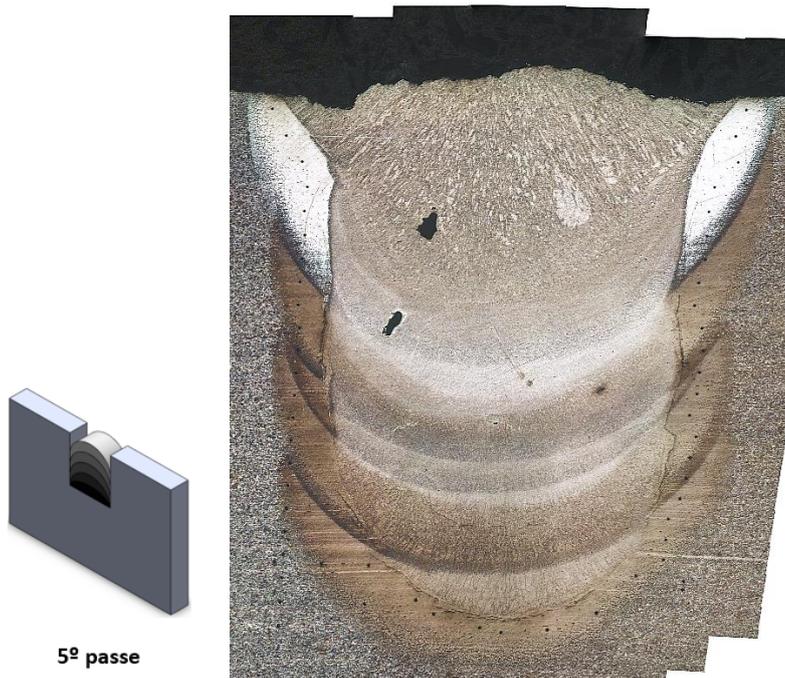


FIGURA 4.20- Esquema da deposição do 5º passe para o CP 1 ao lado da macrografia feita à partir de micrografias.

Seguindo a mesma metodologia para o ensaio de dureza, são apresentados abaixo os gráficos que mostram a **evolução da zona dura**, presente sempre no cordão mais superior do chanfro. Essa zona dura se caracteriza por apresentar valores na faixa de 500 à 600 vickers.

Os diagramas abaixo são apresentados ao lado das fatias onde foram realizadas as identificações, dessa forma é possível identificar, junto à imagem, às regiões que possuem alta dureza.

Na Figura 4.21 é apresentados os valores de dureza para o CP 1, quando apenas 1 passe de solda havia sido feito. Assim sendo, tem-se nas identificações superficiais (1 à 12) valores de dureza correspondente à dureza do metal de base sem influência da energia imposta pelo processo de soldagem.

Da mesma forma é possível verificar duas regiões de elevada dureza nas identificações mais internas do chanfro (identificações 15 à 20). Isso é explicável pela presença da ZTA visível na figura feita à partir de montagens de micrografias.

Essas regiões de elevada dureza são consequências do rápido resfriamento da ZTA no momento da soldagem.

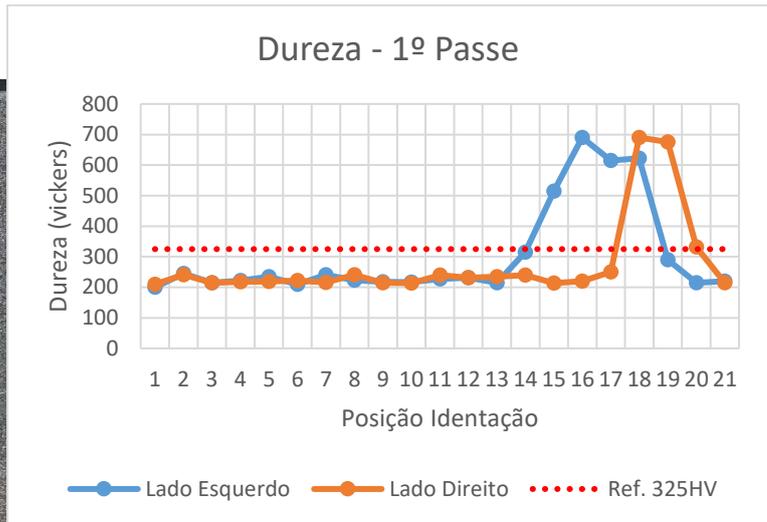


FIGURA 4.21 - Macro do 1º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.

Ainda sobre a Figura 4.21, é perceptível uma diferença na posição dos picos de dureza. Essa diferença é consequência da não simetria na deposição, gerando uma diferença no fluxo de calor para o metal de base e deixando a ZTA com maiores dimensões em um lado do chanfro. No caso acima a ZTA do lado esquerdo (do leitor) é maior e atinge regiões superiores (identações 14 à 18) enquanto a ZTA do lado direito é menor (18, 19 e 20).

Na Figura 4.22 abaixo é apresentado uma ZTA com regiões internas de elevada dureza para o lado esquerdo, porém não apresenta esses valores para o lado direito. Verifica-se na imagem que a ZTA do 2º passe se concentrou do lado esquerdo, explicando a ausência de uma zona muito dura do lado direito.

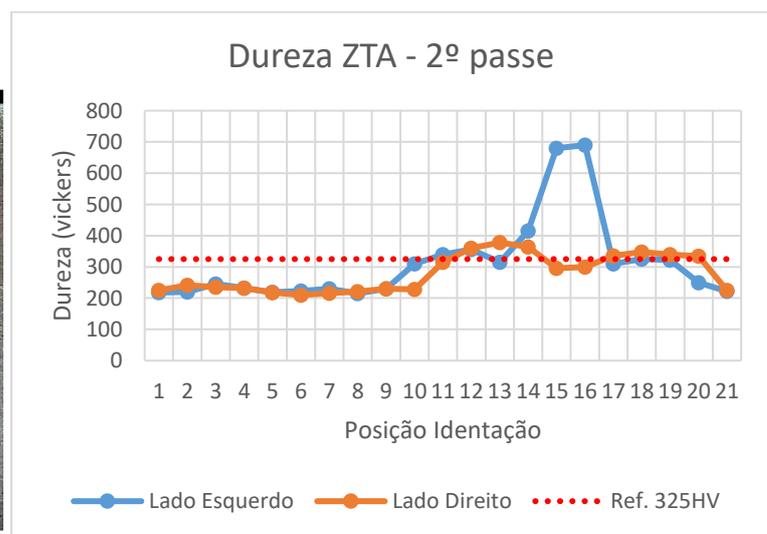
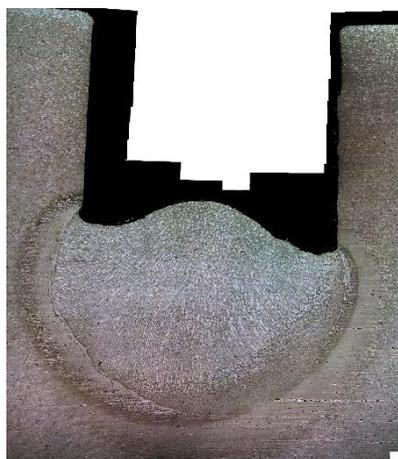


FIGURA 4.22- Macro do 2º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.

Na Figura 4.23 acontece o mesmo fenômeno explicado na Figura 4.13, tendo uma ZTA concentrada em um dos lados.

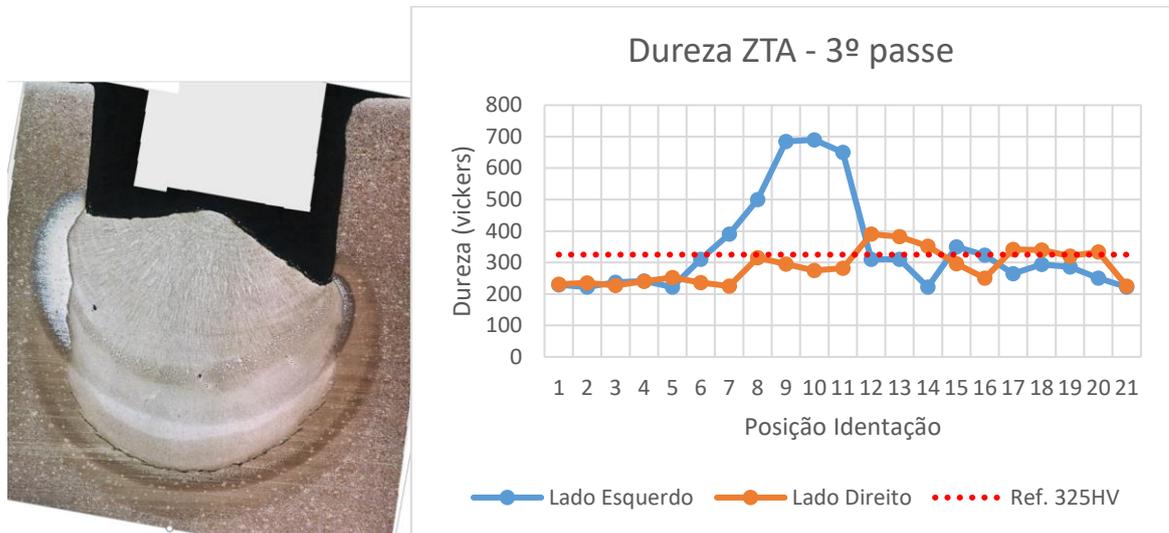


FIGURA 4.23- Macro do 3º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.

Na Figura 4.24 é notável novamente dois picos de dureza, já próximos da superfície. Pela imagem percebe-se que a ZTA do lado direito já alcançou a superfície, enquanto a ZTA do lado esquerdo ainda se mantém em regiões internas do chanfro, explicando a baixa dureza das identações 1 e 2 para esse lado, sendo esses valores de dureza o correspondente ao metal de base.

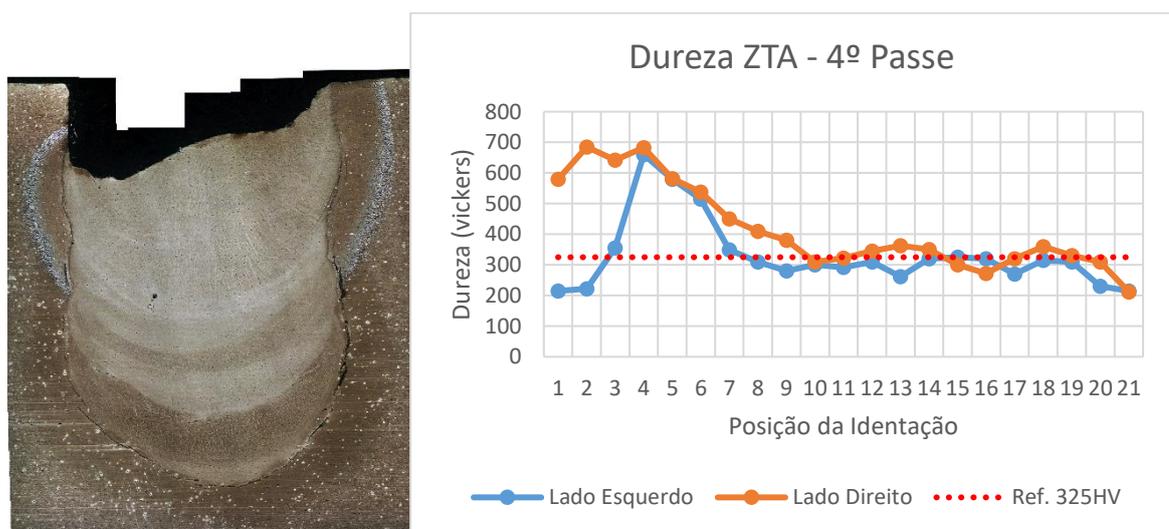


FIGURA 4.24- Macro do 4º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.

Na Figura 4.25 é apresentado o mesmo diagrama já apresentado na Figura 4.8. A imagem ao lado melhora o entendimento e visualização do diagrama. Os picos de dureza na superfície são em razão da última ZTA estar posicionada nessa posição. As regiões internas apresentam picos de dureza, que não são aceitáveis por norma.

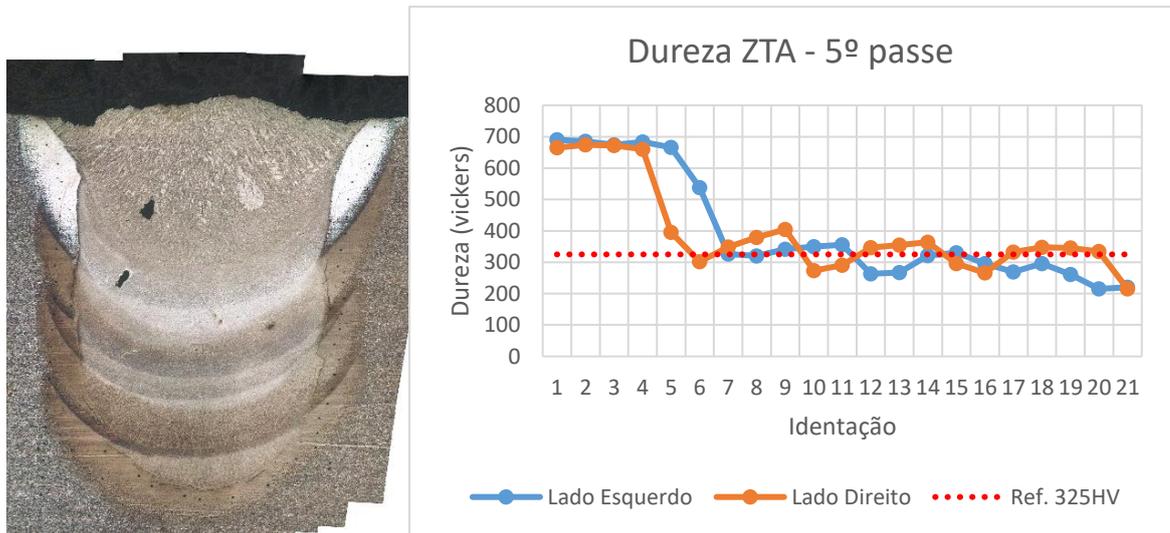


FIGURA 4.25- Macro do 5º passe do CP 1 ao lado do seu diagrama de dureza.

Para entender a evolução da dureza, são apresentados à seguir os gráficos com os valores separados para cada lado e cada passe. Foi levado em conta a posição das identificações que apresentam valores acima do recomendado por norma e foi levantado o histórico em relação à esses pontos considerados “falhos”, para explicação segue os gráficos.

Na Figura 4.26 são apresentados os diagramas dos valores de dureza apenas para o lado esquerdo. Os gráficos são colocados de forma que as posições das identificações (1 à 21) fiquem “empilhadas”.

Nesta análise será possível explicar a presença dos **picos de dureza** em regiões internas do chanfro. Essa explicação será dada utilizando o diagrama de dureza de passes anteriores fazendo uma comparação dos mesmos pontos porém para diferentes quantidades de cordões de solda depositados.

Busca-se assim explicar como a dureza nas diferentes regiões do chanfro foram influenciadas pelo calor imposto por passes subsequentes.

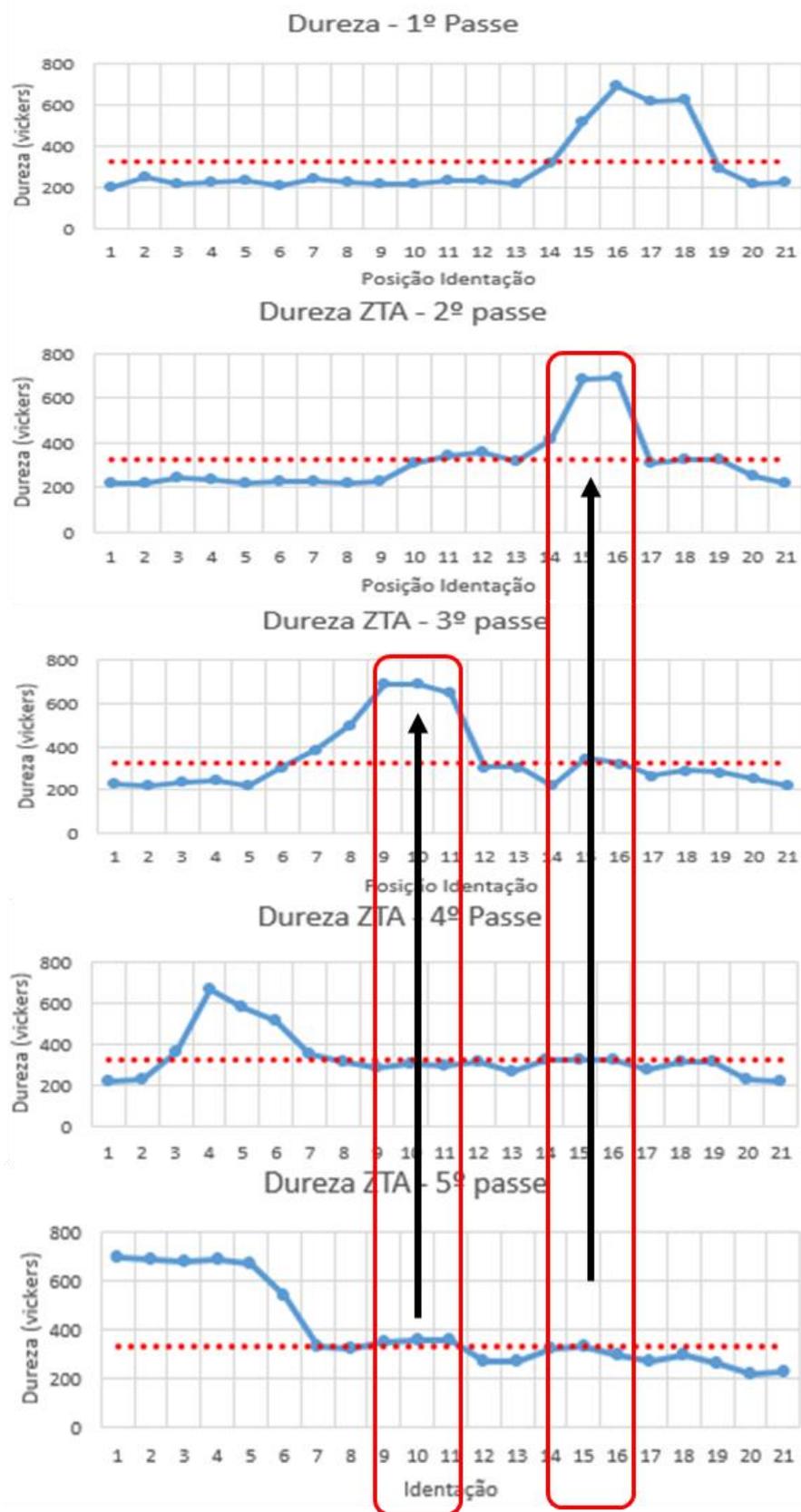


FIGURA 4.26- As setas negras apontam as regiões que, em passes anteriores, apresentam elevada dureza e que, mesmo após os passes subsequentes, permaneceram com dureza elevada até o último passe.

Considerando os diagramas sobrepostos com os valores de dureza para a ZTA do lado esquerdo do CP 1 (sem esmerilhar) tem-se que:

No 5º passe, desconsiderando a região de ZTA superficial, as regiões que apresentaram dureza excessiva são regiões, em que, em passes anteriores foram ZTA superficial de alta dureza, ou seja, regiões de 500 à 600 HV.

As setas negras indicam a “origem” da dureza excessiva, elas evidenciam que em algum passe a dureza foi extremamente alta, e que nem toda essa região sofreu um revenimento adequado dos passes subsequentes, permanecendo com valores excessivos de dureza.

Conclui-se que as regiões internas na junta final que apresentam valores não aceitáveis são regiões que **não sofreram um revenimento adequado**, mantendo algumas regiões excessivamente duras. O mesmo é observado para o lado direito do chanfro.

No lado direito também nota-se a presença de regiões internas de elevadas durezas. Esses pontos coincidem com regiões que já foram uma “ZTA superficial”.

A manutenção da dureza em valores acima dos desejáveis mostra que o calor imposto pelos passes subsequentes não está sendo suficiente para revenir toda a extensão da ZTA, permanecendo com regiões duras.

Na Figura 4.27 é apresentada **a evolução da dureza** para o lado direito do chanfro do CP1.

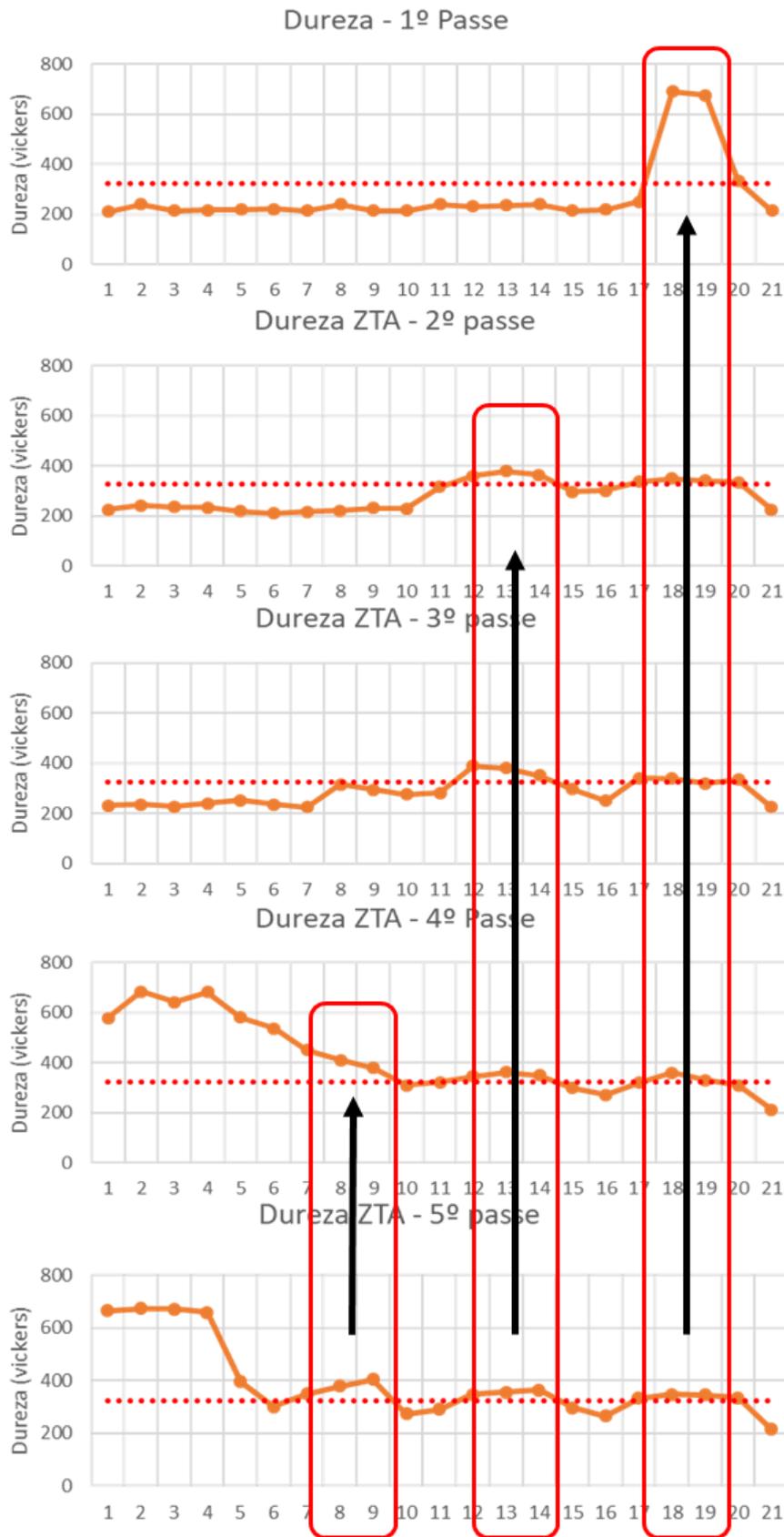


FIGURA 4.27- As setas negras apontam as regiões que, em passes anteriores, apresentam elevada dureza e que, mesmo após os passes subsequentes, permaneceram com dureza elevada até o último passe.

Como os corpos de prova que foram submetidos ao processo de esmerilhamento não apresentaram regiões internas com durezas elevadas é possível afirmar também que eles sofreram um processo de revenimento adequado pois a utilização do calor é mais eficiente, já que as ZTAs dos passes realizados ficam mais próximas umas das outras devido a retirada de parte do reforço.

4.6 Efeito do Revenimento

Com a metodologia de obtenção das macros à partir de micros, é possível analisar uma região específica com suas identificações, e assim observar melhor o efeito do revenimento da ZTA na soldagem multipasses. Nas figuras abaixo é perceptível a diferença no tamanho das identificações entre a região superficial que possui cerca de 600HV e as regiões revenidas, com valores abaixo de 325HV.

Na Figura 4.28 são apresentadas macrografias com destaque para uma região específica da ZTA, sendo ela o lado direito do CP1, nele é identificado a região analisada, em vermelho.

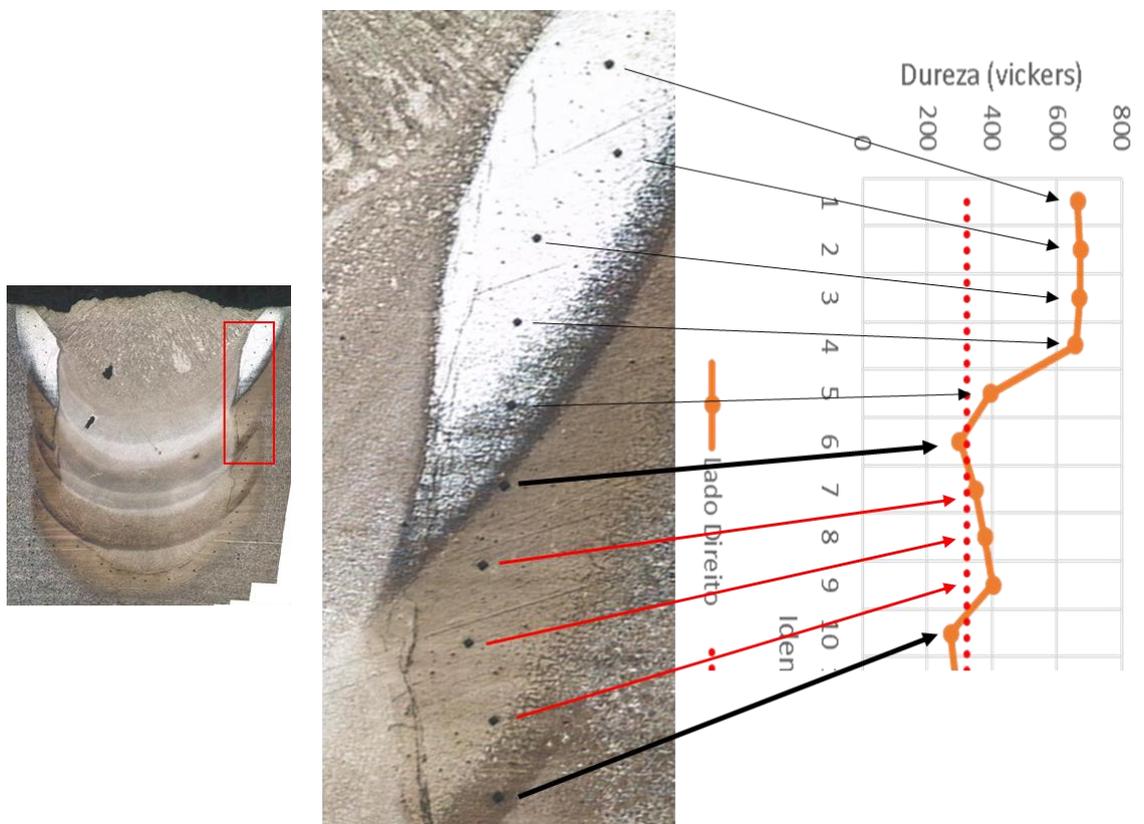


FIGURA 4.28- À esquerda macrografia do CP 1 com a região em vermelha em destaque. Em destaque a região superficial e interna da ZTA, evidenciando a diferença de dureza entre as identificações.

Primeiramente é notável o menor tamanho para as identações 1, 2, 3 e 4, que estão localizadas na região de ZTA superficial.

Ainda na imagem verifica-se a elevada dureza pela falta de revenimento nas identações 7, 8 e 9.

Pode-se verificar também as regiões onde o revenimento foi efetivo, diminuindo consideravelmente os valores de dureza, que são nas regiões de identificação 5, 6, e 10, para esse intervalo apresentado.

Na Figura 4.29 abaixo é apresentado o CP 4 que também não sofre o processo de esmerilhamento apesar de sofrer o processo de inversão de sentido. Na região destacada em vermelho é possível verificar as identações e é perceptível a falta de revenimento adequado nas identações 10; 13, 14, 15 e 16, marcados por setas vermelhas.

As regiões indicadas pelas setas pretas e marcadas pelas identações 11, 12 e 17 apresentam valores de dureza abaixo de 300HV e pela imagem é possível verificar o seu revenimento efetivo, o que reflete na propriedade dessas regiões.

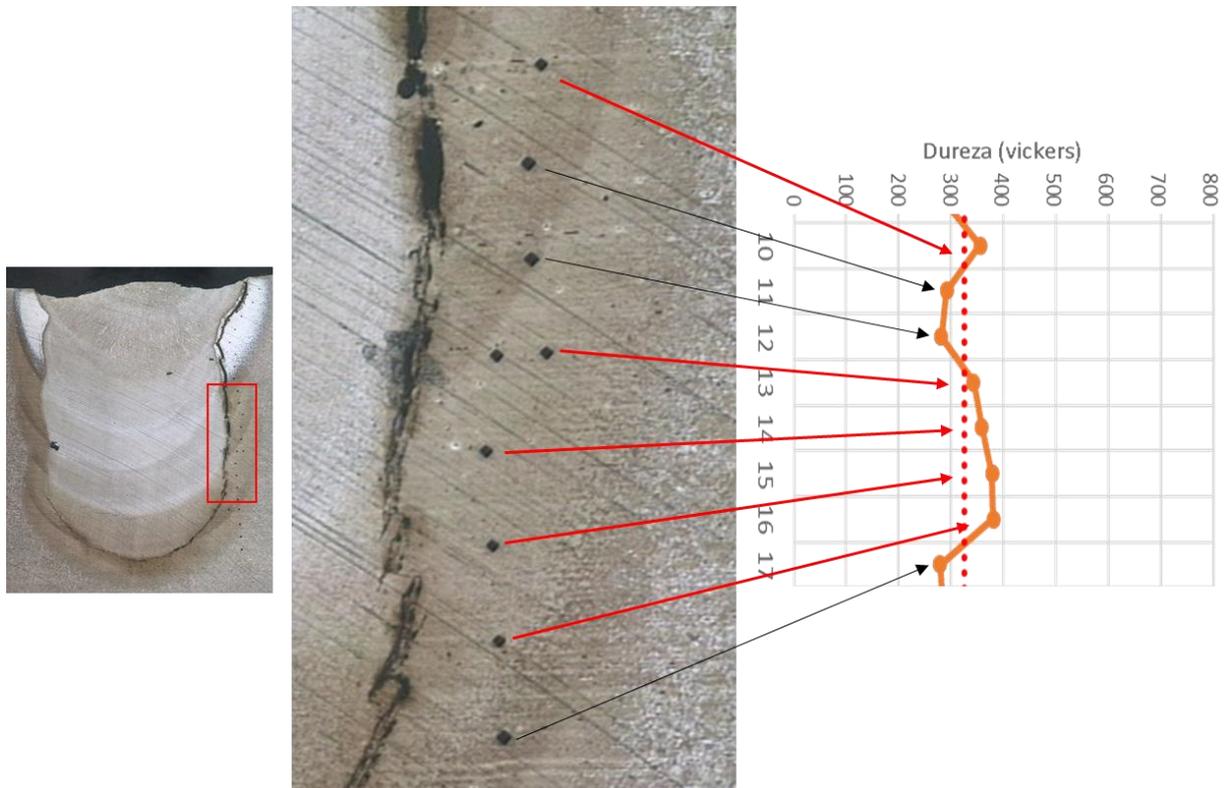


FIGURA 4.29- À esquerda macrografia do CP 4 com a região em vermelha em destaque. Em destaque a região interna da ZTA, a diferença de dureza entre as identações evidencia a dependência do grau de revenimento nessa propriedade.

4.6.1 Efeito do revenimento com a técnica de esmerilhamento.

Aplicando a mesma metodologia aos corpos de prova que sofreram esmerilhamento, é possível verificar que a ausência de picos de elevada dureza se dá pelo efeito do revenimento mais efetivo. O revenimento é mais intenso nesses corpos de prova devido a presença de um maior número de ZTAs, ou seja, tem-se regiões que atingiram temperaturas mais elevadas mais próximas umas das outras.

Na Figura 4.30 é apresentada a macrografia do CP 5, que sofreu apenas o processo de esmerilhamento e nela é apresentada a ZTA do último passe, basicamente martensítica e com elevados valores de dureza (700 a 600HV) apontadas pela seta vermelha.

Logo abaixo dessa região é perceptível uma coloração mais escura por toda a extensão interna da ZTA, isso ocorre porque essas regiões sofreram um aquecimento significativo do passe subsequente, sofrendo então um alto grau de revenimento, refletindo na coloração mais escura pela liberação do carbono que estava em solução sólida. Esse alto grau de revenimento reflete na diminuição dos valores de dureza, sendo medidos valores abaixo de 325 vickers.

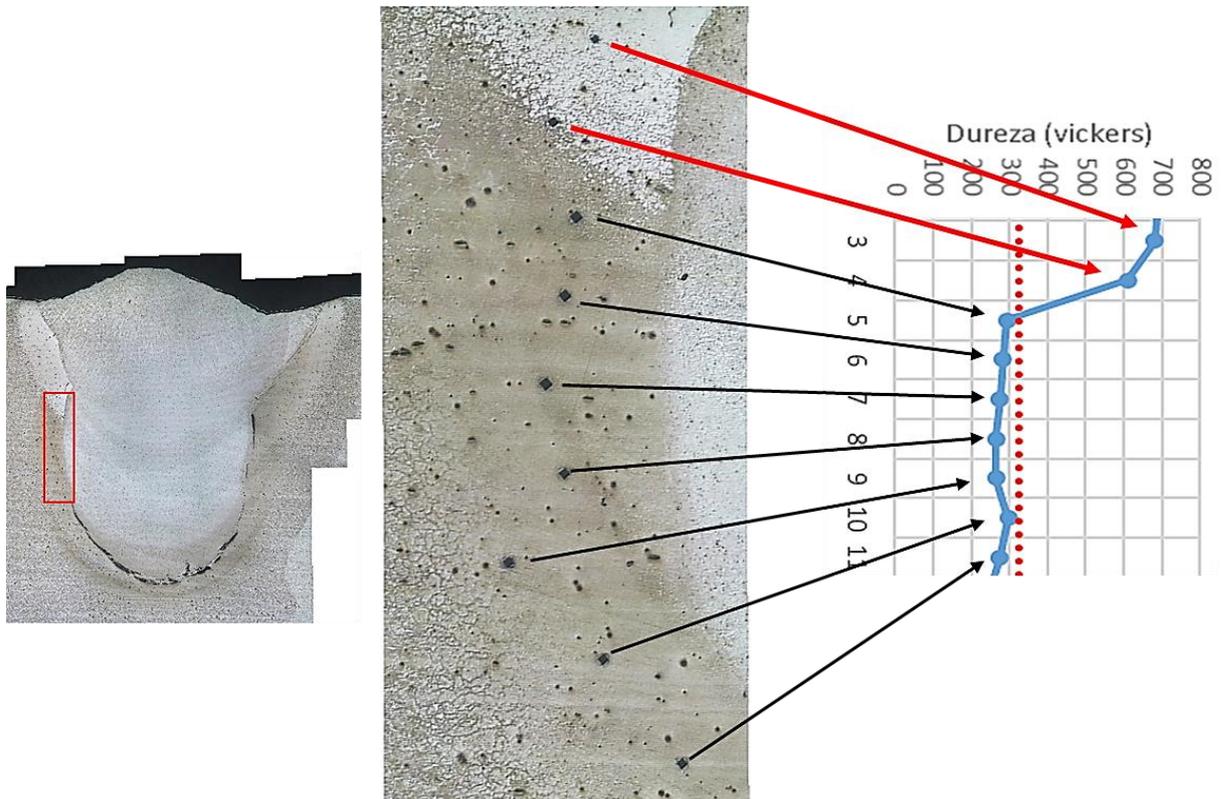


Figura 4.30 À esquerda macrografia do CP 5 com a região em vermelha em destaque. Valores elevados de dureza para a ZTA superficial. Regiões internas com coloração mais escura e menores valores de dureza, efeito do revenimento.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões apresentadas, neste trabalho tem-se como principais conclusões:

1. O método de esmerilhamento se mostrou eficaz para prevenir que haja uma região com excesso de dureza em regiões internas em uma solda multipasses, porém aumenta o tempo de soldagem devido à preparação à cada passe e aumenta também o número de passes necessários.
2. O método de inversão de sentido não influenciou positivamente quanto aos resultados obtidos para revenimento da ZTA e portanto apresentou regiões de dureza acima de valores estabelecidos por norma. O mesmo acontece com as soldas multipasses que não utilizam a inversão de sentido nem tampouco o esmerilhamento.
3. O chanfro de abertura como utilizado é um bom método para estudo de ZTA em soldas subaquáticas multipasses.
4. A aplicação da técnica de esmerilhamento controlado pode melhorar significativamente algumas características de juntas produzidas por soldagem molhada contribuindo para alcançar resultados requeridos para a qualificação de procedimentos de soldagem molhada classe A, conforme AWS D3.6M

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se para trabalhos futuros:

1. Fazer testes de impacto e/ou fadiga para medir a tenacidade das ZTA's produzidas utilizando cada método.
2. Criar uma metodologia para análise das propriedades da zona fundida para os métodos de esmerilhamento e inversão de sentido.
3. Utilizar um chanfro semelhante porém com a presença de um backing, visando eliminar a formação/propagação de trinca à frio que surge na parte inferior do primeiro passe.
4. Aplicar o método de "temper bead" em juntas semelhantes e avaliar a redução da dureza na ZTA próximo à superfície.
5. Estudar o efeito nas propriedades mecânicas em soldagem subaquática multipasses utilizando outros métodos de tratamento térmico pós-soldagem (TTPS), como a utilização de indução eletromagnética.
6. Aplicar as técnicas estudadas em chanfros "V" dentro da norma estabelecida para produção de corpos de prova, assim validando os métodos como ua ferramenta de melhorias das propriedades mecânicas de soldas subaquáticas molhadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, W.M. “Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico posterior”. Dissertação de mestrado-Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Underwater Welding Code. ANSI/AWS D3.6M:2010.

ANDRADE, L. G. D. “Efeito do Teor de Carbono do Metal de Adição e do Metal de Base Sobre a Porosidade do Metal de Solda Subaquática”, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 101f, 2010;

ARRAES JÚNIOR, R. M. “Avaliação da Tenacidade da ZAC na Soldagem do Aço ABNT 4340 sem Tratamento Térmico Posterior”. Fortaleza, 2001. Dissertação de mestrado-Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará.

ASM Metals Handbook - Volume 06 -Welding, Brazing and Soldering, TA459.M43 1990 620.1'6 90-115; ISBN 0-87170-377-7(V.1), SAN 204-7586 ISBN 0-87170-382-3, Printed in THE UNITED STATES OF AMERICA, 1993.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Article IWB-4000, Repair Procedures. New York, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química, NBR NM 87/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Critério de Classificação dos Aços, NBR NM 172/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Materiais Metálicos – Dureza Vickers. Parte 1 – Medição de Dureza Vickers. NBR NM 188-1. Rio de Janeiro. Maio. 1999.

AWS D3.6M: 1999: Specification for underwater welding, American Welding Society, Miami, USA 1999.

BAILEY, N. “Weldability of ferritic steels”. England: Abington Publishing, 1994, 275p.

BRACARENSE. A. Q., PESSOA. E. C. P., SANTOS. V. R., MONTEIRO. M. J., RIZZO. F. C., PACIORNIK. S., REPPOLD. R., DOMINGUES. J. R., VIEIRA. L. A. 2008. “Comparative study of commercial electrodes for underwater wet welding”. IIW International Congress - 2nd Latin American Welding Congress XXXIV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem. São Paulo. SP. 2008.

CHRISTENSEN N. The Metallurgy of MMA Hyperbaric Welding, SINTEF report N°. STF34 F83032, Trondheim, 1983.

COE, F.R. “Welding steels without hydrogen cracking”. The Welding Institute, Cambridge, 1973. 68 p.11. NACE. Basic corrosion course. Anton de S. Brasunas. Houston- Texas, 11th ed., June 1990.

DAVID, S. A., VITEK, J. M. “Correlation between Solidification Parameters and weld microstructures”. International Materials Reviews. Vol. 34, Nº 5, pp. 213-245, 1989.
FILHO, J.C.P; MELLO, R.T.; MEDEIROS, R.C.; PARANHOS, R. Histórico Recente da Soldagem Subaquática Molhada, 2004;

FUKUDA T., SUMIYA R., KONO W., SUEZONO N., TAMURA M., e CHIDA, I. “Temper-Bead Weld by Underwater Laser Beam Welding”, 17th International Conference on Nuclear Engineering, Brussels, Belgium, July 12–16, 2009.

GRANJON, H. 1972 “La Fissuration à Froid en Soudage D’acieres. Soud”. Tec. Conn, 26 (3/4), mar/1972. p155-164.

GRAVILLE, B. A. “Cold Cracking in Welds in HSLA Steels”. Welding of HSLA (microalloyed) Structural Steels, Proc. Int. Conf., American Society for Metals, 1976

GUERRERO, F. P. “Effect of nickel additions on rutile electrodes for underwater welding”. Dissertação de mestrado – Metallurgical and Materials Engineering Department, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, EUA, 84f , 2002.

H.T. Zhang, X.Y. Dai, J.C. Feng, L.L. Hu. “Preliminary investigation on real-time induction heating-assisted underwater wet welding”. Weld. Journal., 94 (2015), pp. 8–15

HASUI, A., AND SUGA, Y. 1980. “Oncooling of underwater welds”. Transactions of the Japan Welding Society 11: 21–28.

HIGUCHI, M.; SAKAMOTO, H.; TANIOKA, S. “A study on Weld Repair Through Half Bead Method”. IHI Engineering Review. V.13, april/1980.

IBARRA, S., GRUBBS, C. E., LIU, S. “State-of-the-Art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel”, Proceedings: Internationaal Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans, Louisiana, 1994. pp 49-67.

J. ŁABANOWSKI, D. FYDRYCH, G. ROGALSKI. “Underwater Welding - A Review”. Poland, Gdańsk, 2008

KOU, S. “Welding Metallurgy”, A Wiley-Interscience Publication, 2th, EUA, 2003;

KOU, Sindo. “Welding Metallurgy”. 1ed. New York: John Wiley & Sons, 1987. 411p

KÜCHLER, M. M. – “Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem de Dutos em Operação”. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 95 pg. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – Porto Alegre, RS – 2009

LIU S., POPE, A.M., AND DAEMEN, R., “Welding Consumables and Weldability”, International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, Louisiana, USA, 1994. pp.321-350.

MARINHO, R. R.; PAES, M. T. P.; PESSOA, E. C. P.; BRACARENSE, A. Q.; SANTOS, V. R.; ASSUNÇÃO, C. R.; MONTEIRO, M. J.; DOMINGUES, J. R. “Perspectivas e Desafios para a Aplicação da Soldagem Subaquática Molhada na PETROBRAS”. Rio Welding. Rio de Janeiro, 2014

MAZZAFERRO, J. A. E. “Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem Subaquática com Eletrodos Revestidos”. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 1998.

METALS HANDBOOK. “Heat Treating of Steels”. 10ed. Ohio: American Society for Metals, v.4, 1991

METALS HANDBOOK. “Selection of Carbon and Low Alloy Steel”. 10ed. Ohio: American Society for Metals, v.6, 1992.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. Curso de Metalurgia da Soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 1992. 297p.

NACE. “Basic corrosion course”. Anton de S. Brasunas. Houston- Texas, 11th ed., June 1990.

NIÑO, C. E. B. “Especificação de procedimentos de reparo por soldagem sem tratamento térmico posterior - Efeito de revenimento produzido pelos ciclos térmicos”. Florianópolis, 2001. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

OLSEN, K. et al. “Weld bead Tempering of the Heat-Affected Zone”. Scandinavian. Journal of Metallurgy, nov/1982. p. 163-168.

PESSOA E. C. P., BRACARENSE A. Q., DOS SANTOS V. R., MONTEIRO M. D. J., VIEIRA L. A., MARINHO R. R.: “Challenges to develop an underwater wet welding electrode for “class A welds” classification, as required in the AWS D3.6 code”. ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research 2013, pp. 259

PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P., “Study of Re-Melt Temper Bead and Polarity Effects on Porosity in the Under Freshwater Wet Welds”. 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004, Vancouver. Proceedings of OMAE04

PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., SANTOS. V. R., MONTEIRO. M. J., RIZZO. F. C., MARINHO, R. R., VIEIRA. L. A., SILVA, D. B. 2013. “Wet Welding Field Trials In Shallow Waters For Structural Repairs In Floating Oil Production Units”. OMAE 2013 June 9-14, 2013, Nantes, France.

PESSOA, E.C.P. “Estudo da Variação da Porosidade ao Longo do Cordão em Soldas Subaquáticas Molhadas”, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Tese, 157f, 2007.

POPE, A.M., LIU, S. “Hydrogen Content of Underwater Wet Welds Deposited by Rutile and Oxidizing Electrodes”, OMAE, Volume III, Mechanical Engineering, 1996;

POPE, A.M.; MEDEIROS, R.C.; LIU, S. “Solification of Underwater Wet Welds”. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Material Engineering, Vol. III, pp. 54-63, April, USA, 1995.

SAVAGE W. F., NIPPES, E. F., AND SZEKERES, E. S. Weld. Joints, 55: 276s, 1976;

SHEWMON, P. “Transformations in metals”. McGraw-Hill, USA, 1969, 394 p.

SILVA, W.C.D; PESSOA, E.C.P.; BRACARENSE, A.Q.; RIBEIRO, L.F.; ÁVILA, T. “Diffusible Hydrogen on Underwater Wet Welds Produced With Tubular Shielded Electrodes Using Internal Gas Protection”, Natal, RN, Brazil, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011;

SPERKO, W. J. “Exploring temper bead”. Welding Journal – July 2005 – pag. 37 to 40
Szelagowski, P., and Ibarra, S. 1992. In-situ post-weld heat treatment of wetwelds. Offshore Technology Conference, Houston, Texas.

TEIXEIRA, J.C.G.; POPE, AM. “Técnica de deposição em dupla camada para reparos e modificações sem Tratamento Térmico Pós-soldagem de aço 1.0Cr-0.5Mo”. Soldagem e Materiais, vol 4, n 2, abril/junho 1992, p. 24-27.

TSAI, C. L., AND MASUBUCHI, K. 1979. “Mechanisms of rapid cooling in underwaterwelding”. Applied Ocean Research 1: 99–110.

WAINER, E., BRANDI, S. D., MELO, F. D. “Soldagem-Processos e Metalurgia”. 1ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.494p.

WERNICKE, R., POHL, R. “Underwater Wet Repair-Welding and Strength Testing on Pipe-Patch Joints”, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE – 1998.

WTIA – “Temper Bead Welding”; Welding Technology Institute Australian, March 2006.

YURIOKA, N. et al. “Carbon Equivalent to Assess Cold Cracking Sensitivity and Hardness of Steel Welds”. Nippon Steel Technical Report Nr. 20, Dec. 1982. pp.61-73.