



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

LUIZ ANTONIO FERREIRA

**TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO CONTROLADA - APLICAÇÃO
PRÁTICA**

CURITIBA-PR

2013

LUIZ ANTONIO FERREIRA

**TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO CONTROLADA - APLICAÇÃO
PRÁTICA**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Okimoto

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ ANTONIO FERREIRA

TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO CONTROLADA - APLICAÇÃO PRÁTICA

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora :



Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR



Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR



Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 26 de novembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Elaine Heloisa Marques e aos meus pais que estiveram ao meu lado em todos os momentos, me dando todo suporte e incentivo.

Aos amigos Alexandre Jorge da Silveira Salgado e Romildo Rudek Júnior pelo apoio, motivação e atenção dispensada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso de especialização pelo conhecimento e experiência passados.

Aos meus colegas do curso pela amizade e companheirismo.

À PETROBRAS pela oportunidade de participação no Curso de Especialização em Soldagem realizado na Universidade Federal do Paraná.

À Deus por tudo.

RESUMO

O trabalho tem por objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos na soldagem de reparos utilizando-se das técnicas de deposição controlada meia camada e dupla camada, as quais são utilizados em substituição do tratamento térmico de alívio de tensões após soldagem "TTAT". Os materiais escolhidos para a aplicação destas técnicas foram aço carbono e aço liga 1,25%Cr-0,5%Mo, devido à sua grande aplicação na indústria de petróleo e petroquímica. Após a realização da soldagem nas chapas escolhidas, utilizando as técnicas de deposição controlada, foram então removidos corpos de prova para a execução de ensaios de macrografia, micrografia e dureza, visando a avaliação dos resultados obtidos. Com base nos resultados obtidos, foi possível observar que tanto a técnica de deposição controlada dupla camada quanto a técnica meia camada, apresentaram refinamento dos grãos grosseiros na ZAT e redução da dureza nos dois materiais testados. Porém foi observado que em algumas regiões não apresentaram bons resultados, devido ao fato de que alguns parâmetros essenciais durante a soldagem, tais como energia de soldagem e sobreposição de passes, não foram corretamente seguidos. Podemos concluir então que as técnicas de deposição controlada, para estes materiais testados, são uma alternativa em substituição ao tratamento térmico de alívio de tensões, porém deve-se tomar especial cuidado para que os parâmetros de soldagem sejam rigorosamente seguidos.

ABSTRACT

This study aims to present and discuss the results obtained in welding repairs using the controlled deposition half bead and temper bead techniques, which are used to replace the post welding heat treatment "PWHT ". The materials chosen for the application of these techniques were carbon steel and alloy steel 1.25 % Cr - 0 , 5 % Mo , due to its wide application in the oil and petrochemical industry . Upon completion of welding the plates chosen using the techniques of controlled deposition , were then removed specimens for running tests macrograph , micrograph and hardness in order to evaluate the results. Based on the results obtained , it was observed that both the technique of temper bead as the half bead, presented refinement of coarse grains in the HAZ and reduction of hardness in both materials tested . However it was observed that in some regions did not achieve good results due to the fact that some essential parameters during welding , such as heat input and overlapping passes were not properly followed . We can conclude then that the controlled deposition techniques for these materials tested , are an alternative to replace the post welding heat treatment "PWHT ", but you must take special care that the welding parameters are strictly followed .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DA ZAT E CORRELAÇÃO COM DIAGRAMA DE FASES FE-C. - EASTERLING.....	14
FIGURA 2 – MICROESTRUTURAS ZAT- ONDE: A FOTO A REPRESENTA A MICROESTRUTURA TÍPICA DO METAL DE BASE; B REPRESENTA A REGIÃO PARCIALMENTE TRANSFORMADA; C REPRESENTA A REGIÃO DE RECRISTALIZAÇÃO E D REPRESENTA A REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS. – SINDO KOU	14
FIGURA 3 – DIAGRAMA ACIMA APRESENTA O TAMANHO DE GRÃOS AUSTENÍTICOS EM FUNÇÃO DO PICO DE TEMPERATURA E ENERGIA DE SOLDAGEM PARA UM AÇO MICROLIGADO AO NIÓBIO. – EASTERLING.	17
FIGURA 4 - TÉCNICA DA MEIA-CAMADA – T.LANT E AUTORES	19
FIGURA 5 - DISTÂNCIA S É DEFINIDA COMO DISTÂNCIA MEDIDA NO CORPO DE PROVA PODENDO VARIAR NO MÁXIMO 1,5MM – ASME SEC IX.....	19
FIGURA 6 - SEQUÊNCIA DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DUPLA-CAMADA. – T.LANT E AUTORES.	20
FIGURA 7 – CORPOS DE PROVA UTILIZADOS	25
FIGURA 8- CAMADA SIMPLES.....	25
FIGURA 9 – DUPLA-CAMADA	25
FIGURA 10 – MEIA-CAMADA.....	25
FIGURA 11 – MACROGRAFIA DE DEPÓSITO SIMPLES EM AÇO CARBONO.....	29
FIGURA 12 – MACROGRAFIA DE DUPLA-CAMADA EM AÇO CARBONO.....	29
FIGURA 13 – MACROGRAFIA DE MEIA-CAMADA EM AÇO CARBONO.	31
FIGURA 14 – MACROGRAFIA DE DEPÓSITO SIMPLES EM AÇO LIGA.....	33
FIGURA 15 – MACROGRAFIA DE DUPLA-CAMADA EM AÇO LIGA.....	33
FIGURA 16 – MACROGRAFIA DE MEIA-CAMADA EM AÇO LIGA.	35
FIGURA 17 – PERFIL DE DUREZA EMPREGADO.	36
FIGURA 18 – RESULTADOS DE DUREZA EM AÇO CARBONO.....	37
FIGURA 19 – RESULTADOS DE DUREZA EM AÇO CARBONO POR REGIÕES DA ZAT OBTIDAS NA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS.	38
FIGURA 20 – RESULTADOS DE DUREZAS OBTIDAS EM AÇO LIGA.....	40
FIGURA 21 – RESULTADOS DE DUREZA EM AÇO LIGA POR REGIÕES DA ZAT OBTIDAS NA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS.	41
FIGURA 22 – PERFIL DE DUREZA EMPREGADO.	42

FIGURA 23 – MICROGRAFIA AÇO CARBONO UMA CAMADA SEM TTAT (A) ZAT (B) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS DA ZAT.	43
FIGURA 24 – MICROGRAFIA AÇO CARBONO DUPLA CAMADA SEM TTAT (A) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS QUE FOI REFINADO APÓS DEPOSIÇÃO DA SEGUNDA CAMADA (B) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS DA QUE NÃO FOI REFINADO APÓS DEPOSIÇÃO DA SEGUNDA CAMADA.	43
FIGURA 25 – MICROGRAFIA AÇO CARBONO MEIA CAMADA SEM TTAT (A) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS QUE FOI REFINADO APÓS DEPOSIÇÃO DA SEGUNDA CAMADA (B) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS DA QUE NÃO FOI REFINADO APÓS DEPOSIÇÃO DA SEGUNDA CAMADA.	43
FIGURA 26 – MICROGRAFIA AÇO LIGA UMA CAMADA SEM TTAT (A) ZAT (B) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS DA ZAT.	44
FIGURA 27 – MICROGRAFIA AÇO LIGA DUPLA CAMADA SEM TTAT (A) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS QUE FOI REFINADO APÓS DEPOSIÇÃO DA SEGUNDA CAMADA (B) REGIÃO DE GRÃOS GROSSEIROS DA QUE NÃO FOI REFINADO APÓS DEPOSIÇÃO DA SEGUNDA CAMADA.	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE AÇO CARBONO.	26
TABELA 2- PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE AÇO LIGA.	27
TABELA 3- DUREZAS ENCONTRADAS NOS CORPOS DE PROVA DE AÇO CARBONO NO ENSAIO DE MICRODUREZA.	42
TABELA 4 - DUREZAS ENCONTRADAS NOS CORPOS DE PROVA DE AÇO LIGA NO ENSAIO DE MICRODUREZA.	42

SUMÁRIO

1. Introdução:	10
2. Revisão Bibliográfica.....	11
2.1. Materiais na indústria de processo.....	11
2.2. Soldagem	12
2.2.1. Região de Grãos Grosseiros.....	15
2.2.2. Região de recristalização.....	15
2.2.3. Região de transformação parcial	16
2.2.4. Influência da energia de soldagem na ZAT.....	16
2.3. Técnicas de reparo:.....	18
2.3.1. Meia-camada	18
2.3.2. Dupla-camada.....	19
2.3.3. Soldagem com níquel	21
3. Materiais utilizados no trabalho:	22
4. Metodologia:.....	22
4.1. Seleção das técnicas de deposição controladas a serem utilizadas ...	23
4.2. Definição dos parâmetros de soldagem	23
4.3. Método de avaliação	23
4.4. Definição dos ensaios	23
4.5. Dimensionamento de corpos de prova a serem soldados;.....	24
5. Apresentação e discussão dos resultados	24
5.1. Soldagem	24
5.2. Parâmetros de soldagem	25
5.3. Análise Macrográfica.....	28
5.3.1. Aço carbono.....	28
5.3.2. Aço liga 1.1/4Cr1/2Mo.....	32
5.4. Dureza.....	36
5.4.1. Resultados para o aço carbono	36
5.4.2. Resultados para aço liga 1.1/4Cr1/2Mo.....	39
5.5. Microdurezas.....	42
5.5.1. Resultados para o aço carbono	42
5.5.2. Resultados para aço liga 1.1/4Cr1/2Mo.....	42
5.6. Micrografias.....	43
5.6.1. Aço carbono.....	43
5.6.2. Aço liga	44
6. Conclusão	45
7. Bibliografia	46

1. Introdução:

Em diversas situações, na indústria de petróleo e petroquímica, depara-se com a necessidade de efetuar modificações em equipamentos para melhoria do processo operacional ou reparos visando, basicamente, recuperação das condições de projeto e desta forma, aumento da vida útil.

Estes serviços, na maioria dos casos, levam a necessidade de efetuar operações de soldagem, que a depender de: código de projeto/fabricação; do processo corrosivo ao qual o equipamento está submetido; do material de construção utilizado, determina a necessidade de tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) após soldagem.

Na prática, em muitas situações, a realização do TTAT é de difícil execução, ou até mesmo, não é possível de ser executada, pois, pode acarretar danos ao próprio equipamento como deformações localizadas devido a geometria complexa; tipo e condições do material a ser tratado, carregamento imposto durante TTAT, para o qual o equipamento não está devidamente projetado etc.

Desta forma, algumas técnicas de soldagem à arco foram desenvolvidas sem a utilização de TTAT, visando um alívio térmico e refinamento da microestrutura mais grosseira da região termicamente afetada. Entre as técnicas existentes para reparo sem TTAT, conhecidas como não convencionais e que são previstas em códigos de projeto/fabricação podemos citar: a dupla camada; a meia-camada e a técnica de utilização de eletrodos a base de níquel.

Neste trabalho serão descritas as técnicas não convencionais, aplicações e limitações.

Como forma de avaliar a aplicabilidade e a efetividade das técnicas da dupla camada e a da meia camada em serviços de rotina, foram realizadas soldagem em chapas de aço carbono e aço liga ($1 \frac{1}{4}\%Cr$, $\frac{1}{2} Mo$); avaliado, qualitativamente, o grau de refinamento da região da ZAT do metal de base e efetuado perfil de dureza visando verificar a eficácia das técnicas.

2. Revisão Bibliográfica.

2.1. *Materiais na indústria de processo.*

Os aços, de maneira geral, são os principais materiais utilizados na indústria de petróleo, petroquímica e química.

Dentre os mais comuns estão os aços carbono manganês, que correspondem a, aproximadamente, 80% das aplicações em uma planta de petróleo, sendo que, em muitas situações, tanto o projeto mecânico quanto o de processo são ajustados de forma a permitir seu uso, por exemplo, uso de inibidores de corrosão, maior sobre-espessura de corrosão etc.

Como os processos de refino de petróleo e petroquímico estão cada vez mais severos e complexos, a demanda pelo uso de materiais que resistam a estas condições de: maior temperatura e pressão de operação e maior corrosividade, é necessário, então, utilizar aços com adição de elementos de liga, como por exemplo, os aços Cr-Mo, que possuem, como principal característica, resistência a altas temperaturas, resistência ao ataque pelo hidrogênio e a corrosão sulfídrica.

Há também o uso dos aços inoxidáveis, dos mais variados tipos, cuja escolha depende do serviço ao qual o equipamento será submetido.

O processo de fabricação mais utilizado para a construção de equipamentos utilizados na indústria de processo é a soldagem, onde os materiais podem ser unidos por diversos processos de soldagem disponíveis.

A soldagem além de ser utilizada para a construção é também aplicada em reparos, modificações que se façam necessários nos equipamentos ao longo de sua vida útil, mais especificamente, durante as manutenções.

De acordo com SVENSSON, 1993 as propriedades importantes para aços de uso estrutural são: resistência mecânica (tensão de resistência, escoamento), tenacidade e soldabilidade.

Na aplicação de aços para construção de vasos de pressão, podemos dizer que a tenacidade é uma das propriedades mais importantes.

A tenacidade pode ser traduzida pela resistência ao impacto e na construção de vasos de pressão, vários níveis de resistência ao impacto são estabelecidos, em razão da aplicação do equipamento ou do código de projeto/fabricação.

2.2. Soldagem

Do ponto de vista de fabricação, o processo mais utilizado na construção de equipamentos para a indústria de processo é a soldagem, onde os materiais podem ser unidos por diversos processos disponíveis.

A soldagem além de ser utilizada para a construção é, também, aplicada em reparos e em modificações que se façam necessárias nos equipamentos ao longo de sua vida útil, mais especificamente, durante as manutenções.

Assim sendo, uma das características importantes para a aplicação de um material na construção de vasos de pressão é a sua soldabilidade, que pode ser definida como a habilidade de um material, ou combinação de materiais, a serem soldados durante fabricação e que tenham bom desempenho quando em uso.

A soldabilidade pode ser definida em função das seguintes variáveis, que são:

- 1- Processo de soldagem utilizado;
- 2- Composição e propriedades mecânicas do metal de base e metal de solda;
- 3- Sequência de soldagem;
- 4- Energia de soldagem;
- 5- Projeto e tamanho da junta;
- 6- Consumíveis;
- 7- Restrição;
- 8- Ambiente.

Na soldagem de fabricação de um vaso de pressão as chapas são aquecidas à temperaturas acima do ponto de fusão e desta forma, submetida a um ciclo térmico que depende basicamente de: espessura da chapa; energia de soldagem; pré-aquecimento; geometria da junta etc.

A região adjacente à região fundida, conhecida como zona afetada termicamente (ZAT), foi exposta a temperaturas extremamente elevadas que a depender do material das chapas, pode sofrer alterações em suas propriedades mecânicas, devido a alterações metalúrgicas impostas pelo ciclo térmico a que foram submetidas. A ZAT pode ser dividida em três principais regiões, a depender da temperatura atingida, que são:

- 1- Região de grãos grosseiros;
- 2- Região de recristalização;
- 3- Região de transformação parcial;

A figura 1 representa as diversas regiões da ZAT em função da temperatura, relacionando-a com diagrama de fases, de modo a caracterizar as transformações de fases, desconsiderando a cinética de transformação durante as fases de aquecimento e resfriamento.

Observa-se, neste caso que o que caracteriza a extensão da ZAT é a região do metal de base, próximo a região soldada, que foi exposta à temperaturas acima de A1, que no caso dos aços carbonos, é a temperatura de 723°C.

A figura 2 representa a micro estrutura típica das principais regiões da ZAT para um aço com 0,18% de carbono.

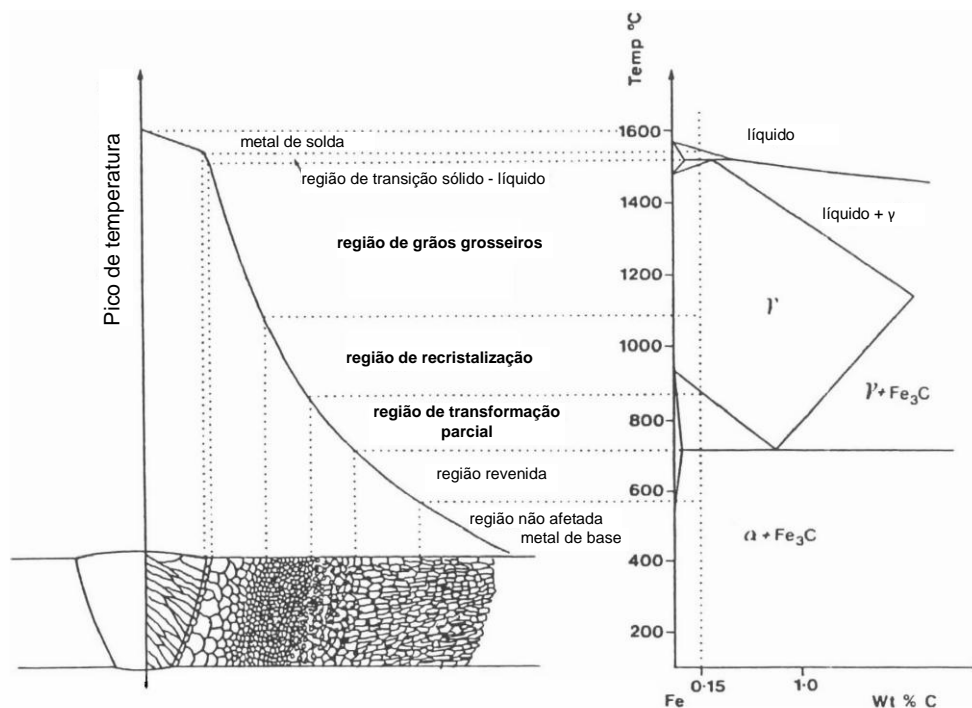


Figura 1 – Representação da ZAT e correlação com diagrama de fases Fe-C. - EASTERLING,1983

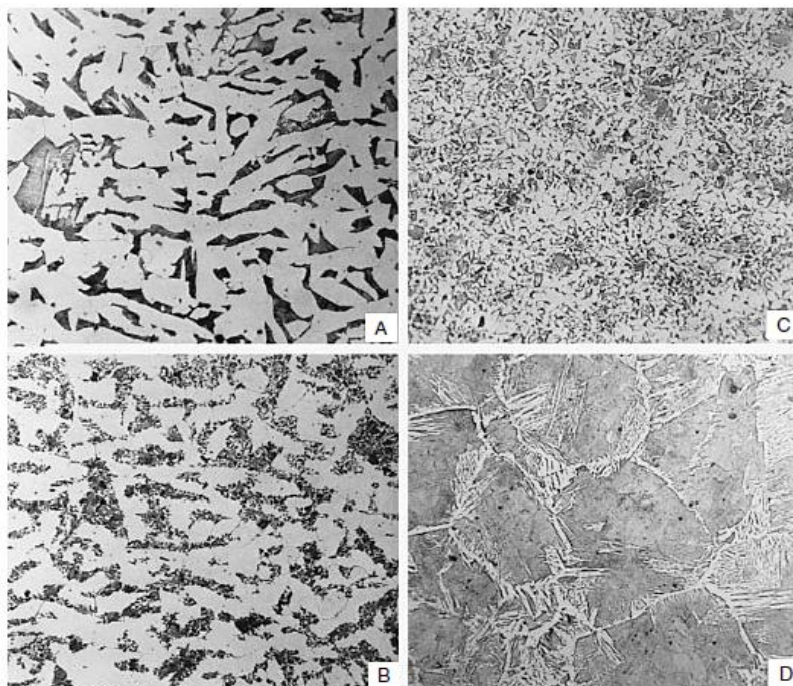


Figura 2 – Microestruturas ZAT- onde: a foto A representa a microestrutura típica do metal de base; B representa a região parcialmente transformada; C representa a região de recristalização e D representa a região de grãos grosseiros. – SINDO KOU, 2003

2.2.1. Região de Grãos Grosseiros

É caracterizada, no caso dos aços, pelo crescimento dos grãos que se transformaram em austenita devido à exposição à altas temperaturas, entre 1100°C – 1500°C.

Segundo a literatura consultada (EASTERLING, 1983; SINDO KOU, 2003; SVENSSON, 1993; LANCASTER, 1999) as altas temperaturas atingidas nesta região fazem com que haja a total transformação dos grãos perlíticos e ferríticos em austenita e também o crescimento destes grãos. Para o caso de aços baixo carbono a alta velocidade de resfriamento e o tamanho grande dos grãos austeníticos, formados durante o aquecimento, facilitam a formação de placas de ferrita a partir dos contornos de grãos os quais são chamados de ferrita de Widmanstätten. Para o caso de aços baixa liga, como por exemplo, os aços Cr-Mo, a microestrutura obtida após resfriamento, nesta região, é tipicamente martensítica, podendo, também, ocorrer a formação de bainita.

Em termos de propriedades mecânicas, para aços, em geral, esta região é caracterizada pela variação do limite de escoamento e de resistência e redução da tenacidade, quando comparado ao metal de base.

2.2.2. Região de recristalização

Conforme literatura (EASTERLING, 1983; SINDO KOU, 2003; SVENSSON, 1993; LANCASTER, 1999) esta região é caracterizada, também no caso dos aços, pela transformação à temperaturas entre 900°C-1100°C. Nesta região os grãos são uniformes em tamanho e mais finos, quando comparados com a região de grãos grosseiros.

Nesta região ocorre a austenitização tanto dos grãos perlíticos quanto dos grãos ferríticos, os quais após resfriamento transformam-se em uma microestrutura refinada de perlita e ferrita. A distribuição de perlita e ferrita não é totalmente uniforme, devido ao pouco tempo, durante o ciclo térmico de

soldagem, para a difusão do carbono, fazendo com que esta nova microestrutura não seja homogênea.

Usualmente nesta região ocorre, também, variação do limite de escoamento e de resistência, como no caso da região de grão grosseiro, mas com características de maior tenacidade.

2.2.3. Região de transformação parcial

Conforme literatura consultada (EASTERLING, 1983; SINDO KOU, 2003; SVENSSON, 1993) esta região é caracterizada, também, no caso dos aços, pela transformação a temperaturas entre 700°C - 900°C, onde a transformação da microestrutura em austenita é parcial.

Esta transformação é parcial, pois durante este aquecimento, a microestrutura que é perlita/ferrita, inicia a decomposição, apenas dos grãos perlíticos, os quais se transformam em grãos austeníticos e expandem-se lentamente sobre os grãos ferríticos. Durante o resfriamento estes grãos austeníticos formados a partir dos grãos perlíticos, são transformados novamente em uma microestrutura extremamente refinada de perlita e ferrita. Nesta região os grãos ferríticos pré existentes não são afetados.

Quando comparado com o metal de base, esta região apresenta, também, melhora das propriedades mecânicas.

2.2.4. Influência da energia de soldagem na ZAT

Dos diversos fatores a serem considerados na soldagem e que influenciam nas propriedades da ZAT, pode-se afirmar que a energia de soldagem é a que exerce maior influência na variação de suas propriedades mecânicas, na microestrutura final obtida, na sua extensão etc. De maneira geral, quanto maior a energia de soldagem maior a ZAT, maior será, por consequência, a

região de grão grosseiro e os grãos em seu interior. O mesmo ocorre para as demais regiões.

A figura 3 demonstra a influência da energia de soldagem no tamanho da ZAT e no aumento do tamanho de grão na região de grãos grosseiros, na soldagem de um aço microligado ao nióbio. Por exemplo, para uma energia de soldagem de 1 kJ/mm teríamos uma ZAT de 3 mm, porém se aumentarmos a energia de soldagem para 2 kJ/mm teríamos uma ZAT de 6 mm.

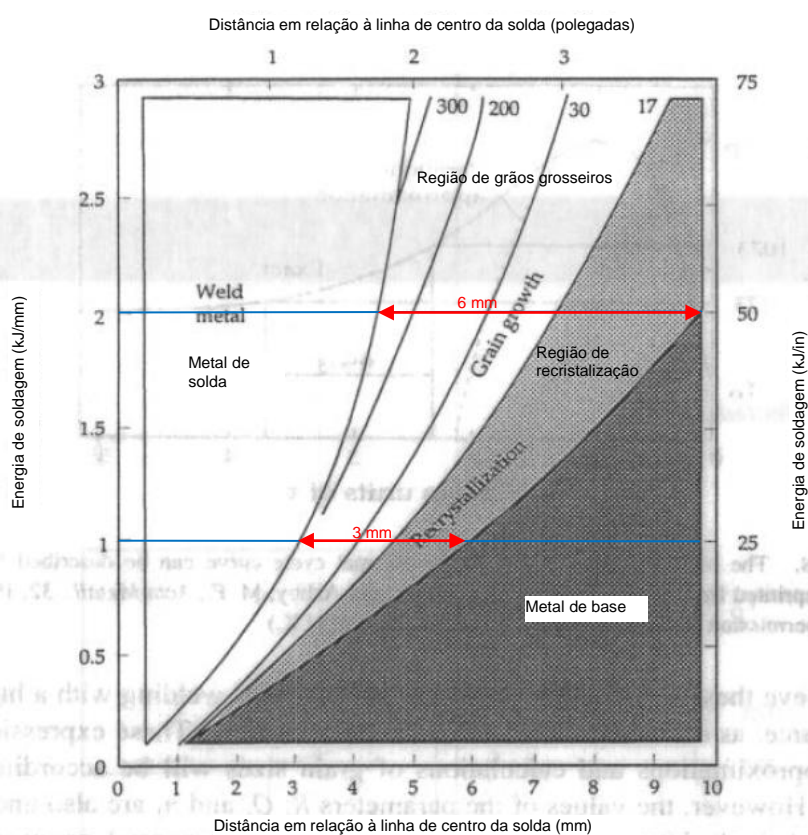


Figura 3 – Diagrama acima apresenta o tamanho de grãos austeníticos em função do pico de temperatura e energia de soldagem para um aço microligado ao nióbio. – EASTERLING, 1983.

2.3. Técnicas de reparo:

2.3.1. Meia-camada

Segundo a literatura (LANT, T.; ROBINSON, D. L.; SPAFFORD, B; STORESUND, J., 2002 e ALORAIER A, A.; AL-MAZROUEE A, A.; PRICE B, J.W.H. ; SHEHATA, T., 2010) a técnica de reparo conhecida como meia-camada, vide figura 4, é executada através de uma deposição controlada de uma primeira camada de solda sobre o material de base, onde uma sobreposição mínima entre passe deve ser garantida, sendo que o desejável é 50%. O eletrodo utilizado nesta primeira camada deve ser de no máximo 3,2 mm de diâmetro, sendo que para a soldagem deve ser empregado uma temperatura mínima de pré-aquecimento e interpasse, que devem ser de acordo com o material de base. Depois de concluída a soldagem desta primeira camada, a metade superior desta deve ser cuidadosamente removida por esmerilhamento e a segunda camada de solda é depositada sobre a superfície esmerilhada utilizando um eletrodo de no máximo 4,0 mm de diâmetro. A sobreposição entre passes também deve ser a mesma utilizada na primeira camada, tomando um especial cuidado para que as extremidades desta segunda camada fiquem o mais próximo possível da borda da primeira camada, caracterizando o passe de revenimento (temper-bead), vide figura 5.

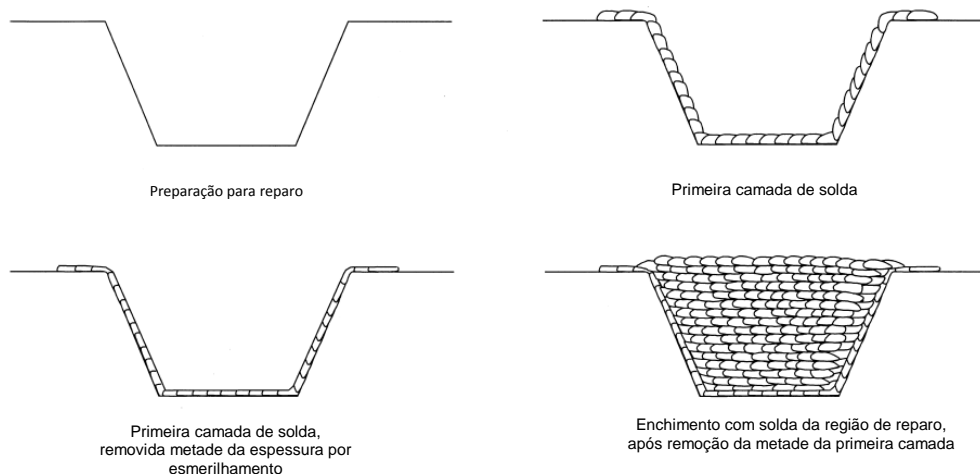


Figura 4 - Técnica da Meia-Camada – LANT, T.; ROBINSON, D. L.; SPAFFORD, B; STORESUND, J

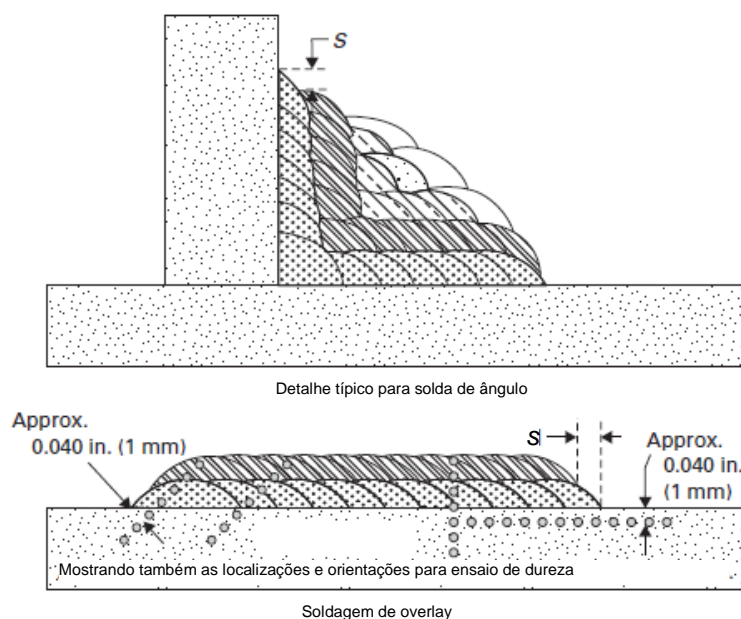


Figura 5 - Distância S é definida como distância medida no corpo de prova podendo variar no máximo 1,5mm – ASME Section IX, 2010

Muito embora esta técnica venha sendo aplicada com sucesso como alternativa ao TTAT, um dos pontos a serem observados é a precisão da remoção do primeiro passe. Uma remoção excessiva acarretará a formação de uma ZTA no metal de base quando da deposição do segundo passe.

Uma remoção insuficiente acarretará não refinamento da ZTA no metal de base provocado pela primeira camada.

2.3.2. Dupla-camada

Segundo a literatura (LANT, T.; ROBINSON, D. L.; SPAFFORD, B; STORESUND, J., 2002 e ALORAIER A, A.; AL-MAZROUEE A, A.; PRICE B, J.W.H. ; SHEHATA, T., 2010) a técnica de dupla-camada é similar à técnica de meia-camada. As principais diferenças são que neste caso não é necessário a remoção da metade superior da primeira camada e um aumento maior da energia de soldagem na segunda camada em relação à primeira camada.

Uma primeira camada deve ser cuidadosamente depositada usando um eletrodo de 2,4 mm de diâmetro. Nesta primeira camada deve ser obtida uma sobreposição de 50% entre os passes e utilizar uma energia de soldagem

mínima possível, com o objetivo obter uma ZAT menor possível e já obter um refinamento na região de grãos grosseiros da ZAT. Concluído esta primeira camada uma segunda camada deve ser depositada, utilizando um eletrodo de 3,2 mm de diâmetro, o qual deve ter uma energia da soldagem maior que o primeiro e com sobreposição entre 40% e 60%. A utilização de um eletrodo de maior diâmetro e energia de soldagem maior tem o objetivo de obter uma maior penetração sobre a primeira camada visando o máximo refinamento da zona de grãos grosseiros na ZAT da primeira camada. Deve-se tomar especial cuidado para que a segunda camada não atinja o metal de base, porém ficando o mais próximo possível que garanta o revenimento da ZAT da primeira camada (temper-bead), que segundo ASME Section IX, 2010 deve ser conforme figura 5. Após conclusão do enchimento a última camada depositada deve ser removida por esmerilhamento, vide figura 6.

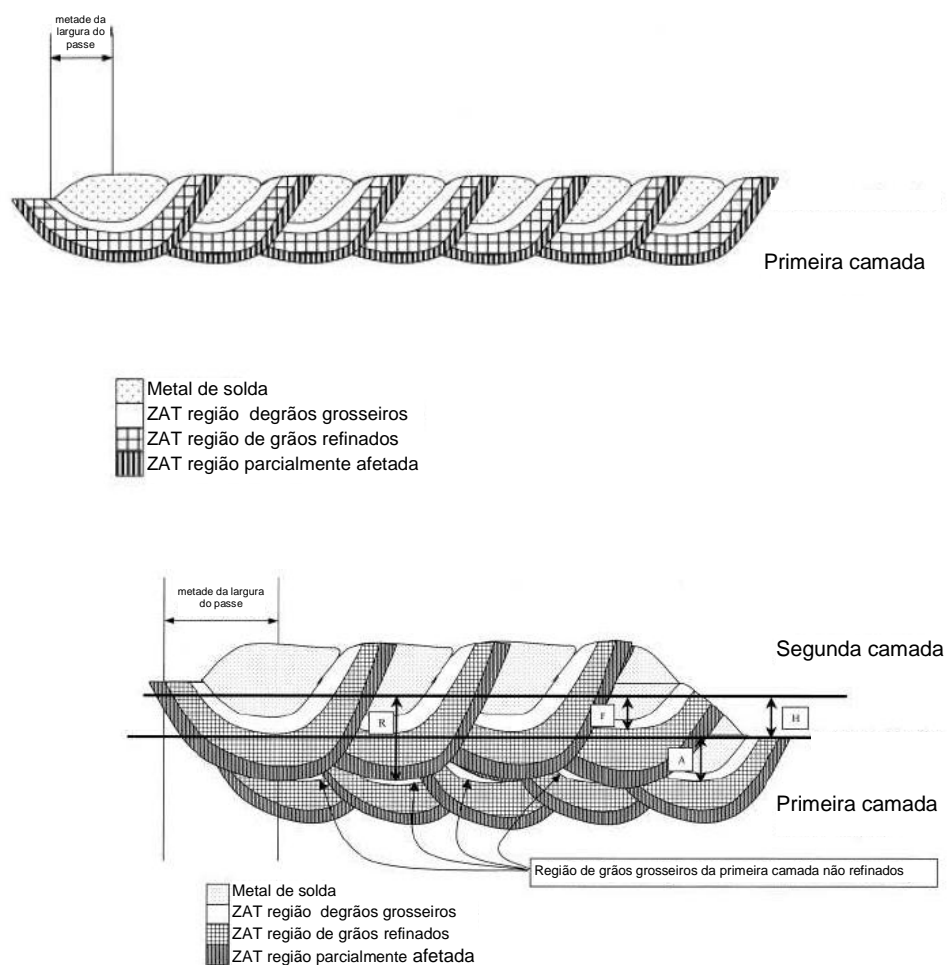


Figura 6 - Sequência de aplicação da técnica de dupla-camada. – LANT, T.; ROBINSON, D. L.; SPAFFORD, B; STORESUND, J. 2002

2.3.3. Soldagem com níquel

Segundo a literatura (LANT, T.; ROBINSON, D. L.; SPAFFORD, B; STORESUND, J., 2002) a utilização de eletrodos a base de níquel, conhecida como reparo a frio, foi desenvolvida na antiga União Soviética ao final da década de 60. O objetivo era de reparos de aços Cr-Mo-V e Cr-Mo.

A utilização de eletrodos a base de níquel, para aços que trabalham em temperaturas elevadas, era preferida, principalmente quando comparada com a utilização de consumíveis em aço inoxidável austenítico, em razão de:

a- Coeficiente de expansão térmica do metal depositado próximo a do metal de base.

b- metal de solda e metal de base com menor tendência de formação de martensita

c- para equipamentos que operam em temperatura elevada, menor tendência a migração de carbono do metal de base para o metal de solda, fenômeno este que ocorre em serviço.

Na década de 70 foi desenvolvido estudo pelo Comitê de Energia Elétrica da Grã Bretanha, CEGB, um estudo de soldagem para reparos de aços baixa liga utilizando consumíveis a base de níquel conhecidos comercialmente como Inconel 182, AWS – NiCrFe3.

Uma das características observadas neste estudo foi a de que para soldagem com eletrodos de níquel, em geral, era necessária uma baixa energia de soldagem, resultando, desta forma, numa ZAT “estreita” e com tamanho de grãos austenítico na região de grãos grosseiros, considerados pequenos, quando comparado com a ZAT obtida pela soldagem com eletrodo similar ao metal de base.

Quando comparada com técnicas de deposição controlada, a habilidade do soldador também é reduzida, pois não existe a exigência de sobreposição entre passes.

Apesar de todas as vantagens citadas, as técnicas de deposição controlada como meia-camada e dupla-camada, têm sido preferidas, pois, a soldagem com eletrodos de níquel são susceptíveis à fadiga térmica e desta maneira, tem sido utilizada somente como reparo temporário. Outra desvantagem desta técnica é o fato de não ser possível inspecionar a peça após soldagem por ultrassom.

3. Materiais utilizados no trabalho:

Neste trabalho foram utilizados como materiais de base chapas de aço carbono e de aço liga (1 ¼%Cr, ½%Mo) comumente usados na fabricação de vasos de pressão aplicados na indústria de petróleo.

O metal de adição empregado foi o AWS-E7018, baixo hidrogênio, muito utilizado na soldagem de fabricação e reparos de vasos de pressão.

4. Metodologia:

Para realização deste trabalho foi adotada a seguinte metodologia:

- 1- Seleção das técnicas de deposição controladas a serem utilizadas;
- 2- Definição dos parâmetros de soldagem;
- 3- Método de avaliação;
- 4- Definição dos ensaios;
- 5- Dimensionamento de corpos de prova a serem soldados;

4.1. Seleção das técnicas de deposição controladas a serem utilizadas

As técnicas utilizadas neste trabalho foram a de meia-camada e dupla-camada, que são mais empregadas na indústria de petróleo como forma de evitar o TTAT.

4.2. Definição dos parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem adotados foram estabelecidos a partir de procedimento de soldagem convencional. O soldador foi orientado a seguir as recomendações das técnicas de deposição controlada, simulando assim, a aplicação de campo.

4.3. Método de avaliação

Foi definido como método de avaliação o grau de refinamento qualitativo da ZTA de grão grosseiro do metal de base e dureza.

Como forma de comparar a eficiência das técnicas empregadas de deposição controlada, foi efetuada a soldagem com posterior TTAT para o aço liga, o mais crítico do ponto de vista de soldabilidade.

4.4. Definição dos ensaios

Os ensaios adotados foram os seguintes:

- a- Microdureza Vickers com carga de 300 g – com a finalidade de avaliar, com maior precisão, as diferentes regiões da ZTA.
- b- Dureza com carga de 5kgf – normalmente utilizada em qualificação de procedimentos.
- c- Metalografia- para avaliação do refino de grão da ZAT.

4.5. Dimensionamento de corpos de prova a serem soldados;

Foram utilizadas chapas em dimensões que possibilitassem a deposição dos cordões de soldas no centro da chapas, distante das bordas. A espessura escolhida foi a de uso comum na fabricação de vasos de pressão em refinaria de petróleo.

Foram utilizadas duas chapas para execução de soldagem, com 300 mm de comprimento por 250 mm, sendo uma em aço carbono com 24 mm de espessura e outra em aço liga (1 ¼%Cr, ½%Mo) com 30 mm de espessura vide figura 7.

5. Apresentação e discussão dos resultados

5.1. Soldagem

As chapas de teste foram divididas em três regiões onde a soldagem ocorreu na seguinte forma:

Região 1: Soldado apenas uma camada com 5 passes de solda, figura 8;

Região 2: Soldado duas camadas, sendo a primeira com 5 passes de solda e a segunda com 4 passes de solda, técnica da dupla-camada, figura 9;

Região 3: Soldado duas camadas, sendo primeiramente efetuado a execução de 5 passes em uma camada. Após a execução desta primeira camada, foi então removida a metade superior da camada e então depositado uma segunda camada de solda com 4 passes, técnica da meia-camada, figura 10.



Figura 7 – Corpos de prova utilizados

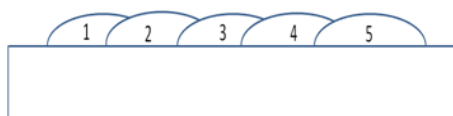


Figura 8- Camada simples

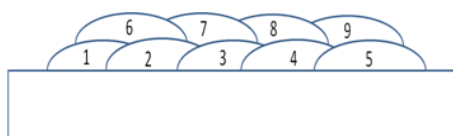


Figura 9 – Dupla-camada

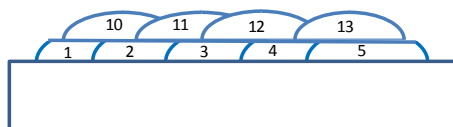


Figura 10 – Meia-camada.

5.2. *Parâmetros de soldagem*

A soldagem foi executada por soldador qualificado, conforme os requisitos do ASME IX, na posição plana e os parâmetros levantados durante a soldagem encontram-se nas tabelas 1 e 2 abaixo. Vale salientar que o soldador não foi previamente treinado para a execução da soldagem nas técnicas de deposição controlada, sendo apenas orientado na forma de execução, como tem sido feito em serviços de reparos em geral.

O consumível utilizado tanto para a soldagem do aço carbono quanto para o aço liga foi o AWS E-7018, pois, o objetivo deste estudo é o de avaliar a

influência do controle de parâmetros de soldagem na ZAT no que diz respeito ao refino de grãos e alívio de tensões.

Os parâmetros de soldagem tais como: corrente, tensão, velocidade de avanço foram estabelecidos através da prática normal de soldagem, obtidos em especificações de procedimentos de soldagem (EPS) qualificados para aços carbono utilizados na fabricação de vasos de pressão.

Com relação a temperatura de pré-aquecimento, o valor utilizado de 75 °C, para o aço liga 1 1/4%Cr-1/2%Mo, não é o usualmente utilizado para soldagem deste tipo de material, que normalmente é de 200°C.

Com base nos resultados apresentados nas tabelas 1 e 2 observa-se que a relação da energia de soldagem entre a primeira camada e a segunda camada, em todos os casos, não atingiu a relação entre energias conforme é citado na literatura, que estabelece valores entre 1,4 a 2,0 para garantir o refino da região de grãos grosseiros da primeira camada.

Tabela 1- Parâmetros de soldagem na soldagem dos corpos de prova de aço carbono.

Parâmetros de soldagem para deposição controlada técnica dupla camada									
Camada	Passo	Consumível	Ø (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de soldagem (J/mm)	Energia média por camada (J/mm)	Relação da Energia entre a primeira e a segunda camada
1	1	E-7018	2,5	89	32	3,9	730,3	845,8	0,96
1	2		2,5	87	32	3,1	898,1		
1	3		2,5	88	31	3,0	909,3		
1	4		2,5	86	29	3,0	831,3		
1	5		2,5	86	30	3,0	860,0		
2	6	E-7018	3,2	116	26	4,2	718,1	814,9	
2	7		3,2	118	27	3,9	816,9		
2	8		3,2	116	28	3,8	854,7		
2	9		3,2	117	29	3,9	870,0		

Parâmetros de soldagem para deposição controlada técnica meia camada									
Camada	Passo	Consumível	Ø (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de soldagem (J/mm)	Energia média por camada (J/mm)	Relação da Energia entre a primeira e a segunda camada
1	1	E-7018	2,5	89	32	3,9	730,3	845,8	1,00
1	2		2,5	87	32	3,1	898,1		
1	3		2,5	88	31	3,0	909,3		
1	4		2,5	86	29	3,0	831,3		
1	5		2,5	86	30	3,0	860,0		
2	10	E-7018	3,2	116	28	4,5	721,8	848,5	
2	11		3,2	117	28	3,4	963,5		
2	12		3,2	114	29	3,7	893,5		
2	13		3,2	116	26	3,7	815,1		

Material de base: Aço carbono
Espessura: 24,00 mm
Pré aquecimento: 75 °C

Tabela 2- Parâmetros de soldagem na soldagem dos corpos de prova de aço liga.

Parâmetros de soldagem para deposição controlada técnica dupla camada									
Camada	Passe	Consumível	Ø (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de soldagem (J/mm)	Energia média por camada	Relação da Energia entre a primeira e a segunda camada
1	1	E-7018	2,5	95	31	3,9	755,1	883,8	0,82
1	2		2,5	96	33	3,4	931,8		
1	3		2,5	95	32	3,4	894,1		
1	4		2,5	95	34	3,4	950,0		
1	5		2,5	94	34	3,6	887,8		
2	6	E-7018	3,2	119	24	4,6	620,9	724,0	
2	7		3,2	119	25	3,9	762,8		
2	8		3,2	118	24	3,8	745,3		
2	9		3,2	118	26	4,0	767,0		

Parâmetros de soldagem para deposição controlada técnica meia camada									
Camada	Passe	Consumível	Ø (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de soldagem (J/mm)	Energia média por camada	Relação da Energia entre a primeira e a segunda camada
1	1	E-7018	2,5	95	31	3,9	755,1	883,8	0,93
1	2		2,5	96	33	3,4	931,8		
1	3		2,5	95	32	3,4	894,1		
1	4		2,5	95	34	3,4	950,0		
1	5		2,5	94	34	3,6	887,8		
2	10	E-7018	3,2	117	25	4,0	731,3	819,4	
2	11		3,2	117	26	3,3	921,8		
2	12		3,2	118	25	3,3	893,9		
2	13		3,2	118	26	4,2	730,5		

Material de base: Aço liga 1 ¼ Cr - ½ Mo

Espessura: 30,00 mm

Pré aquecimento: 75 °C

5.3. Análise Macrográfica

5.3.1. Aço carbono

A figura 11 representa a macrografia de aço carbono com deposição simples com eletrodo de 2,4mm de diâmetro.

Nesta macrografia é possível observar que não foi atendido o requisito de sobreposição entre passes que deveria ser de, aproximadamente, 50%, de modo que o passe seguinte já promova um refinamento da ZAT do passe anterior. Para que esta condição fosse atendida a metade da largura de um passe deveria ser igual a distância entre os centros dos passes. Na figura 11 é possível observar que distância da metade da largura de um passe não é igual a distância entre os centros dos passes.

A figura 12 apresenta a macrografia de uma chapa de aço carbono, soldado pela técnica de dupla-camada.

Semelhante a figura 11 não é observada a sobreposição de 50% entre passes da primeira e da segunda camadas.

Nas bordas, conforme indicado na figura 12, não houve refinamento da região de grãos grosseiros da ZAT. Este refinamento não ocorreu devido ao fato de que a sobreposição da segunda camada em relação a primeira não foi próxima o suficiente das bordas para garantir o refinamento adequado, conforme recomendado em literatura e códigos de projeto e fabricação.

Comparando as figuras 11 e 12 nota-se que nas regiões mais centrais da última figura que houve refinamento da ZAT na região de grãos grosseiros (região indicada na figura 12).



Figura 1 – Macrografia de depósito simples em aço carbono.



Figura 2 – Macrografia de dupla-camada em aço carbono.

A figura 13 representa a macrografia de uma chapa de aço carbono, soldado pela técnica de meia-camada.

Nas bordas, conforme indicado na figura 13, não houve refinamento da região de grãos grosseiros da ZAT. Este refinamento não ocorreu devido ao fato de que a sobreposição da segunda camada em relação a primeira não foi próxima o suficiente das bordas para garantir o refinamento adequado, conforme recomendado em literatura e códigos de projeto e fabricação.

Na região central nota-se que, em alguns pontos, não houve o refinamento da ZAT da primeira camada. O que pode ter ocorrido é que houve uma remoção excessiva da primeira camada em alguns pontos fazendo com que a região de grãos grosseiros da ZAT da segunda camada coincidissem com a região de grãos grosseiros da ZAT da primeira camada.

Comparando as figuras 11, onde foi aplicado apenas uma camada e a 13, onde foi aplicado uma segunda camada, utilizando a técnica da meia camada, nota-se que nas regiões mais centrais da última figura que houve refinamento da ZAT na região de grãos grosseiros (região indicada na figura 13).



Figura 3 – Macrografia de meia-camada em aço carbono.

5.3.2. Aço liga 1.1/4Cr1/2Mo

A figura 14 apresenta a macrografia de aço liga com deposição simples com eletrodo de 2,4mm de diâmetro.

Semelhantemente ao aço carbono, a sobreposição entre os passes foi menor do que o que se considera adequado, em torno de 50% de sobreposição, para permitir que o passe posterior possa refinar, numa determinada proporção, a ZAT do passe anterior. Para que esta condição fosse atendida a metade da largura de um passe deveria ser igual a distância entre os centros dos passes. Na figura 14 é possível observar que distância da metade da largura de um passe não é igual a distância entre os centros dos passes.

A figura 15 representa a macrografia de uma chapa liga, soldado pela técnica de dupla-camada.

Observa-se que houve refinamento da ZAT de grãos grosseiros da primeira camada somente na região central, conforme indicado na figura 15, sob o terceiro passe. Nos demais não houve o refinamento da ZAT. Este refinamento dos grãos grosseiro da ZAT pode não ter ocorrido pelo fato de que a relação entre energia de soldagem entre a primeira e segunda camadas foi de 0,82, e a literatura recomenda que esta relação deve ser entre 1,4 a 1,6.

Nas bordas também não houve o refinamento da região de grãos grosseiros, conforme podemos observar na região indicada na figura 15. No lado direito da figura 15, nota-se que não houve a correta sobreposição entre camadas, ou seja, o passe superior ficou muito distante da borda, não tendo efeito de refinamento sobre a ZAT na borda. No lado esquerdo, ao contrário do observado do lado direito, a sobreposição da segunda camada ficou muito próximo da borda, fazendo com que a região de grãos grosseiros da ZAT desta camada permanecesse no metal de base.



Figura 4 – Macrografia de depósito simples em aço liga.

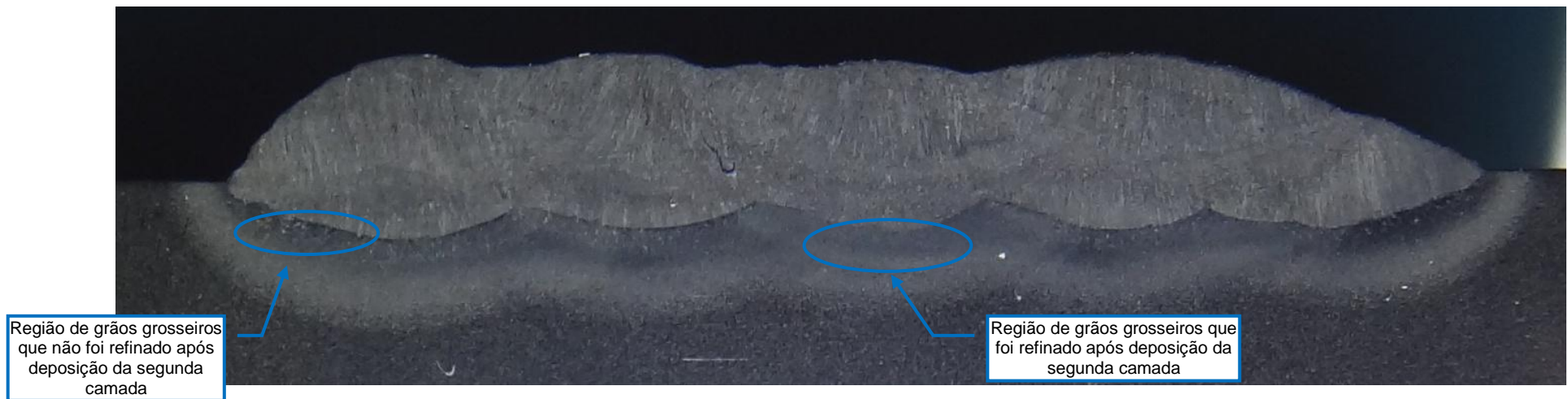


Figura 5 – Macrografia de dupla-camada em aço liga.

A figura 16 apresenta a macrografia de uma chapa de aço liga, soldado pela técnica de meia-camada.

Da mesma forma que observado no aço carbono, não houve refinamento da ZAT pela possível excessiva remoção da primeira camada, fazendo com que a região de grãos grosseiros da ZAT da segunda camada recaísse sobre o metal de base. Neste caso é possível observar que apenas uma pequena região no centro da ZAT de grãos grosseiro houve refinamento, conforme indicado na figura 16.

Nas bordas, como nos casos anteriores, a sobreposição e a distância da segunda camada em relação à borda não foram adequadas, de forma a garantir o refinamento da ZAT do metal de base.

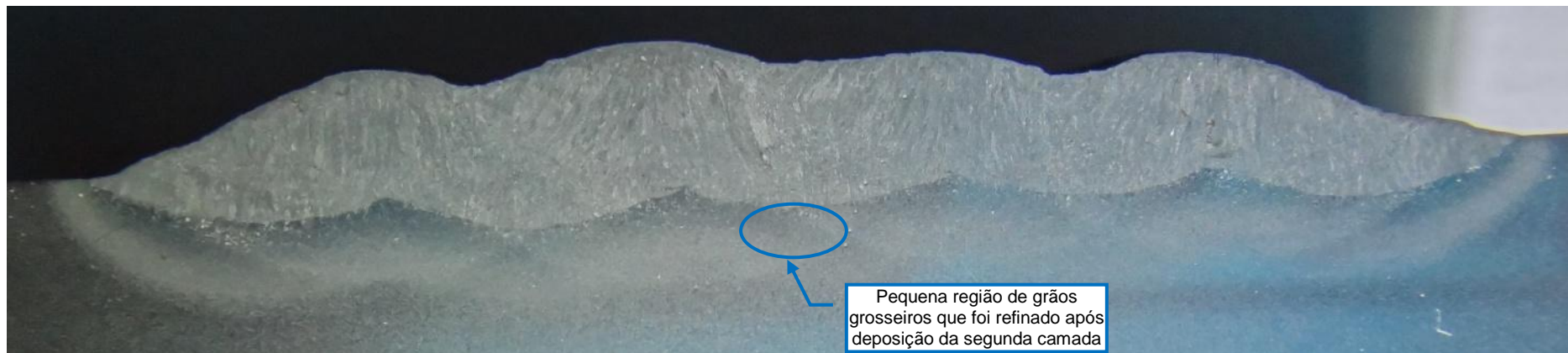


Figura 6 – Macrografia de meia-camada em aço liga.

5.4. Dureza

Foi realizada dureza Vickers em um equipamento de bancada Reicherter Briviskop modelo BRV-187,5H. A carga utilizada na máquina foi de 5 kgf, valor normalmente utilizado na qualificação de procedimentos de soldagem. As medições de dureza foram feitas em vários pontos no metal de base, ZAT e metal de solda, conforme identificado na figura 17, abaixo.

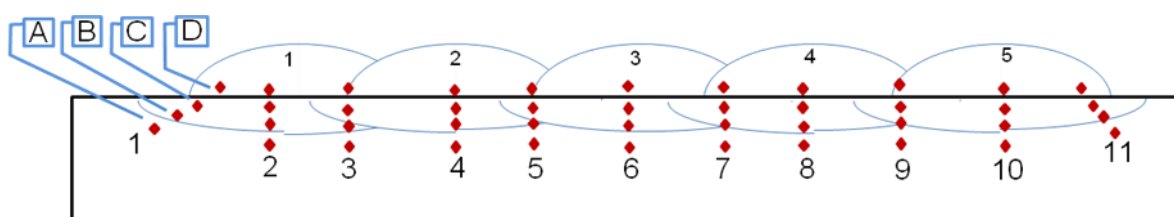


Figura 11 – Perfil de dureza empregado.

Sendo:

- A** Durezas do metal de base
- B** Durezas da ZAT na região de grãos refinados
- C** Durezas da ZAT na região de grãos grosseiros
- D** Durezas no metal de solda

5.4.1. Resultados para o aço carbono

A figura 18 apresenta os valores de dureza obtidos para o aço carbono, considerando o aço com simples deposição, 1 camada, sem TTAT, com a aplicação das técnicas de meia e dupla-camada, sem TTAT.

Nesta figura é possível, também, efetuar a comparação entre as diversas regiões da solda, sendo: ZAT de grãos grosseiros e de grãos refinados, metal de solda e metal de base para cada tipo de deposição efetuada.

Com relação às bordas, evidencia-se que não houve redução de dureza, corroborando com o que foi observado nas macrografias.

Constata-se, também, que a diferença de dureza entre as diversas regiões da solda, para as duas técnicas de deposição controlada, reduziu, em comparação com solda efetuada com simples deposição.

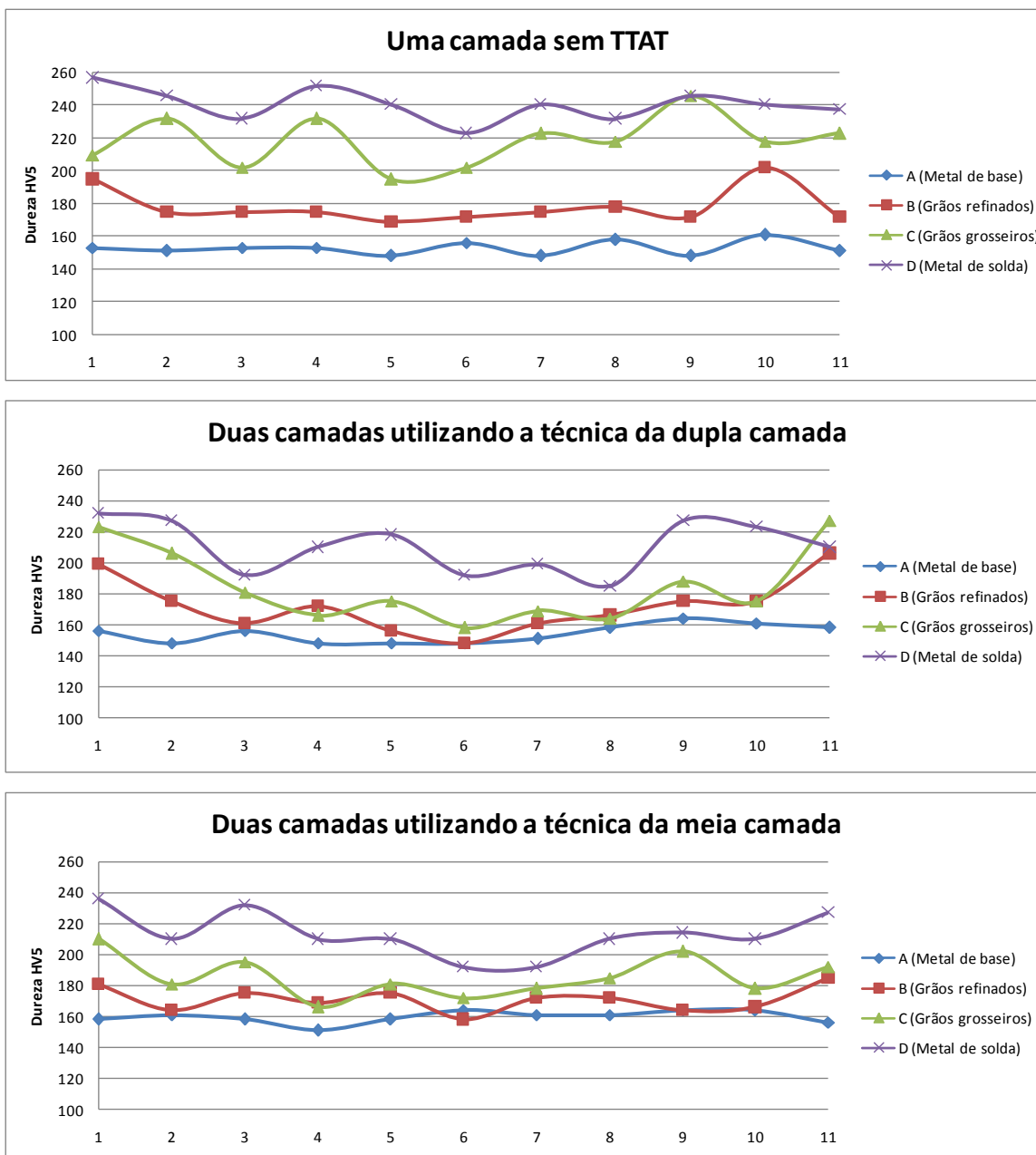


Figura 12 – Resultados de dureza em aço carbono.

A figura 19 apresenta a variação da dureza para cada uma das regiões da solda para as três técnicas aplicadas.

Observa-se que houve redução da dureza da ZAT, de maneira geral, quando da aplicação das técnicas de deposição controlada, sendo que a maior redução ocorreu na aplicação da técnica de dupla-camada.

É possível observar, também, que a região de grãos grosseiros apresentou uma maior redução, quando da aplicação das técnicas de deposição controlada.

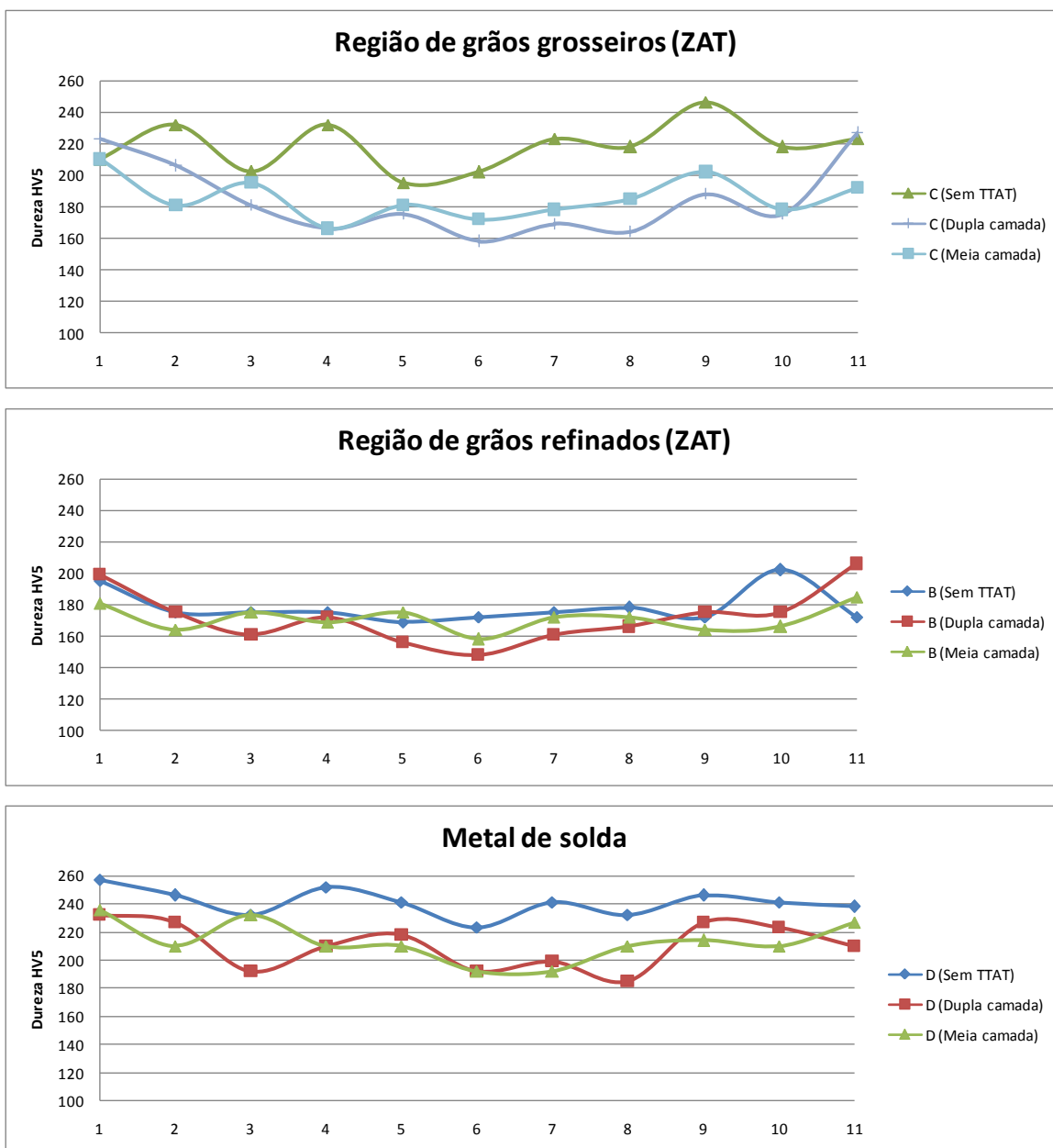


Figura 13 – Resultados de dureza em aço carbono por regiões da ZAT obtidas na aplicação das técnicas.

5.4.2. Resultados para aço liga 1.1/4Cr1/2Mo

A figura 20 apresenta os valores de dureza encontrados para o aço liga, 1 ¼%Cr – ½%Mo, comparando as regiões da solda (metal de base, ZAT grãos grosseiros, ZAT grãos refinados e metal de solda), para as soldas realizadas utilizando as técnicas de meia-camada e dupla-camada, e com material com simples deposição, uma camada, sem TTAT e com TTAT.

Observa-se que o TTAT foi efetivo na redução de dureza das diversas regiões da solda como um todo, apresentado o melhor resultado de redução de dureza quando comparado com as técnicas de deposição controlada de meia-camada e dupla-camada.

Na técnica de dupla-camada observa-se redução da dureza em todas as regiões da solda, com exceção das bordas, pois conforme já citado anteriormente na análise das macrografias a sobreposição da segunda camada sobre a primeira não foi adequada. Entretanto, verifica-se que os valores obtidos encontram-se acima dos valores aceitáveis pelos códigos de projeto e fabricação, que normalmente estabelecem como limite 237HV.

Na técnica de meia-camada não houve redução de dureza. Muito provavelmente pela excessiva remoção da primeira camada.

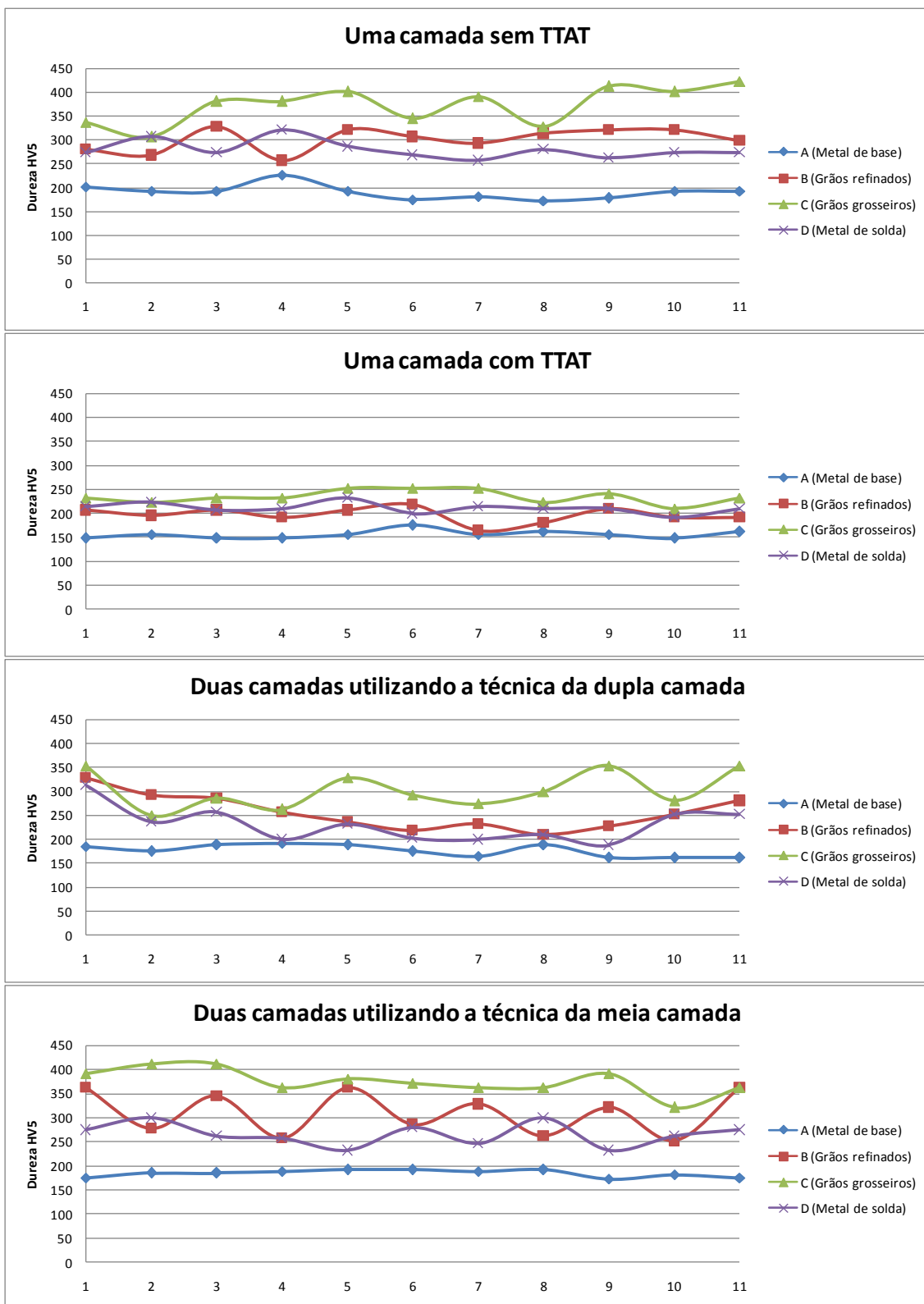


Figura 14 – Resultados de durezas obtidas em aço liga.

A figura 21 mostra a comparação da variação da dureza nas diferentes técnicas de deposição controlada para as diversas regiões da ZAT.

Observa-se que na região de grãos grosseiros a aplicação da técnica de dupla camada obteve-se um melhor resultado em termos de redução de dureza e que foi o que mais se aproximou dos níveis de dureza de um material que foi soldado e tratado termicamente.

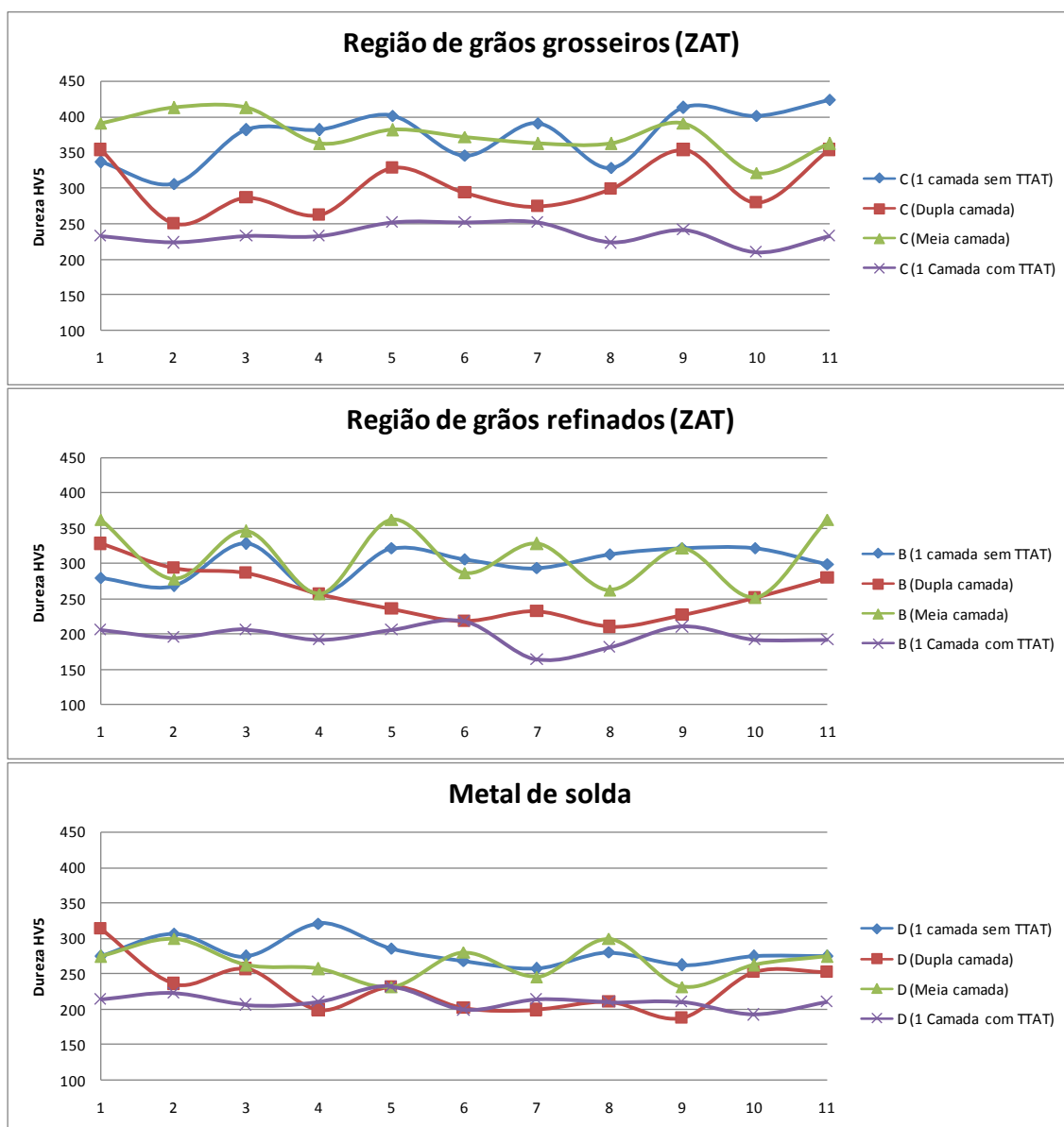


Figura 15 – Resultados de dureza em aço liga por regiões da ZAT obtidas na aplicação das técnicas.

5.6. Micrografias

5.6.1. Aço carbono

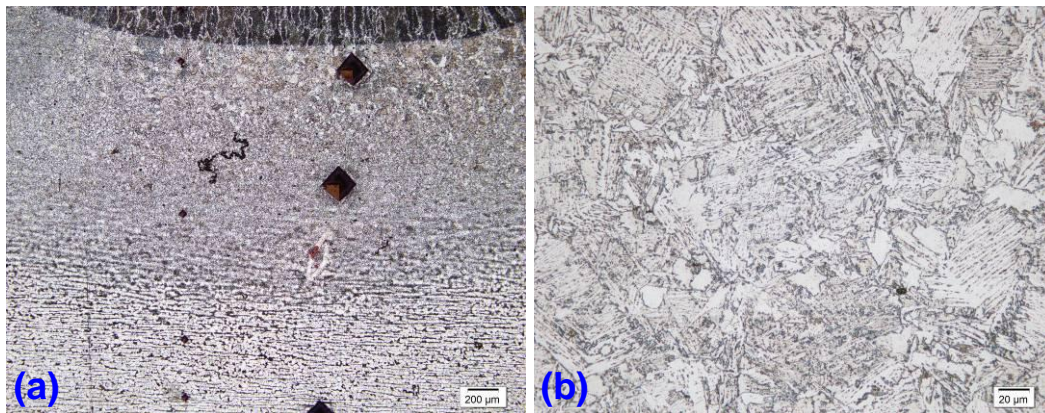


Figura 17 – Micrografia aço carbono uma camada sem TTAT (a) ZAT (b) região de grãos grosseiros da ZAT.

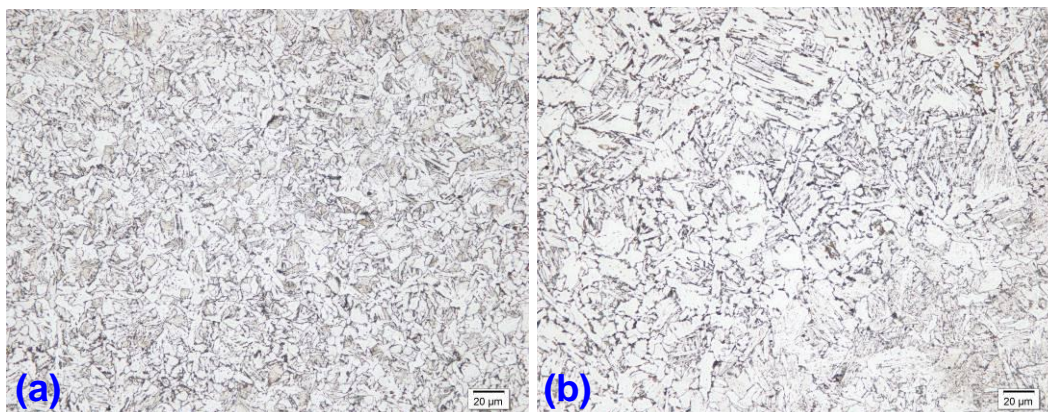


Figura 18 – Micrografia aço carbono dupla camada sem TTAT (a) Região de grãos grosseiros que foi refinado após deposição da segunda camada (b) região de grãos grosseiros da que não foi refinado após deposição da segunda camada.

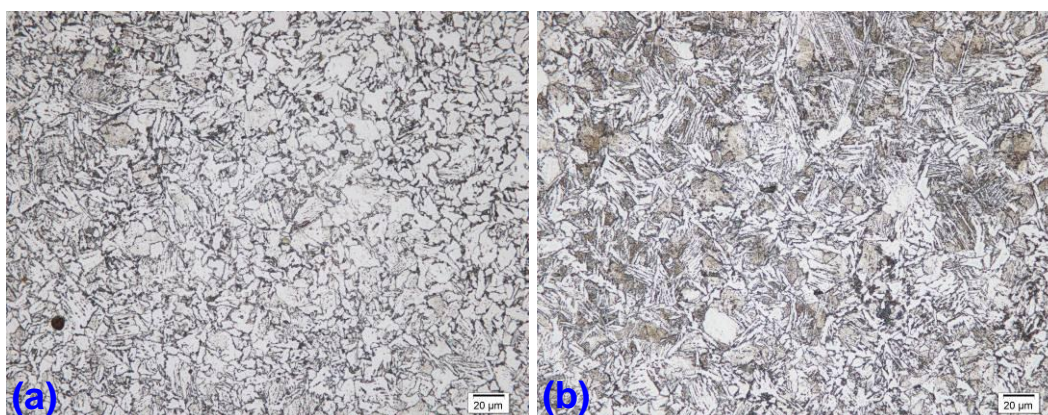


Figura 19 – Micrografia aço carbono meia camada sem TTAT (a) Região de grãos grosseiros que foi refinado após deposição da segunda camada (b) região de grãos grosseiros da que não foi refinado após deposição da segunda camada.

5.6.2. Aço liga

Aço liga uma camada sem TTAT

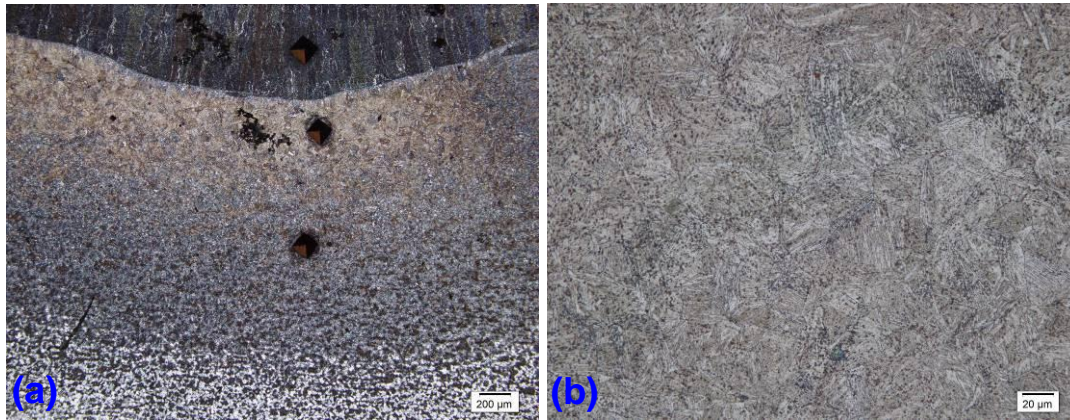


Figura 20 – Micrografia aço liga uma camada sem TTAT (a) ZAT (b) região de grãos grosseiros da ZAT.

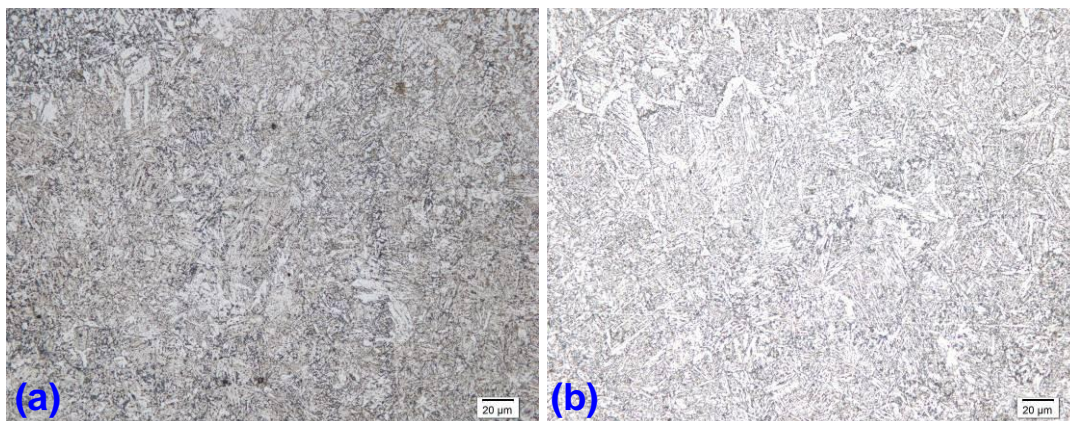


Figura 21 – Micrografia aço liga dupla camada sem TTAT (a) Região de grãos grosseiros que foi refinado após deposição da segunda camada (b) região de grãos grosseiros da que não foi refinado após deposição da segunda camada.

6. Conclusão

Do estudo realizado conclui-se que:

1. As técnicas de deposição controlada apresentaram sucesso tanto no refino de grãos na região de grãos grosseiros na ZAT do metal de base quanto na redução da dureza nesta região, sendo assim uma alternativa que pode ser aplicada em reparos de equipamentos onde exista a necessidade de tratamento térmico de alívio de tensões e este não possa ser realizado.
2. Também podemos concluir com base nos resultados obtidos que para a obtenção deste refino de grãos uniforme em toda a região de grãos grosseiros da ZAT do metal de base é necessário garantir a sobreposição em torno de 50% entre passes, a adequada remoção da primeira camada quando da aplicação da técnica de meia-camada, velocidade de soldagem adequada de modo a obter uma relação adequada de energia de soldagem entre as camadas e a aplicação correta da técnica de deposição controlada nas bordas para obter o adequado refinamento da ZAT nesta região.

7. Bibliografia

ALORAIER A, A.; AL-MAZROUEE A, A.; PRICE B, J.W.H. ; SHEHATA, T. **Weld Repair Practices Without Post Weld Heat Treatment For Ferritic Alloys And, Their Consequences On Residual Stresses: A Review 2010**

ASME Section IX. **Welding and Brazing Qualifications**, 2010. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX.

EASTERLING, K. **Introduction to the Physical Metallurgy of Welding**. 1.ed. Londres, 1983

KOU, SINDO **Welding Metallurgy**. 2.ed. 2003 John Wiley & Sons, Inc.

LANCASTER, J.F. **Metallurgy of Welding**. 6.ed. Cambridge, 1999

LANT, T.; ROBINSON, D. L.; SPAFFORD, B; STORESUND, J. **Review of Weld Repair Procedures for Low Alloy Steels Designed to Minimise the Risk of Future Crecking**, 2002

SVENSSON, LARS ERIK, **Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds**, 1.ed. Gothenburg 1993