

Estudo de Procedimentos de Soldagem MIG/MAG para Aplicação de Revestimentos de Liga de Níquel Inconel 625 em Aço Estrutural ASTM A387 Gr.11

Nathália Escóssio Cavalcante¹, Tathiane Caminha Andrade¹, Pedro Helton Magalhães Pinheiro¹, Hélio Cordeiro de Miranda¹, Marcelo Ferreira Motta¹, Willys Machado Aguiar¹

¹ Universidade Federal do Ceará – UFC, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, CE, Brasil.

Recebido: 29 Nov., 2015
Aceito: 23 Jan., 2016

E-mail: nathalia.escossio@gmail.com
(NEC)

Resumo: O presente trabalho objetiva o estudo de técnicas de soldagem aplicadas a reparo de componentes fabricados em aço ASTM A387 Gr.11, largamente utilizado em aplicações da indústria do petróleo e gás. Devido ao regime de trabalho e necessidade de utilização de materiais com boa resistência mecânica e à corrosão, utilizou-se como metal de adição a liga UNS N06625 (Inconel 625). O processo de soldagem utilizado foi o MIG/MAG e a técnica de soldagem aplicada foi a dupla camada. A metodologia do presente trabalho foi dividida em etapas, sendo a primeira a realização de ensaios exploratórios para definir a relevância dos fatores de controle estudados. A segunda etapa consistiu na aplicação do critério de dureza e de microestrutura para definir as melhores relações de energia para aplicação da técnica da dupla camada. A técnica da dupla camada se mostrou eficaz na melhora das propriedades da microestrutura da ZAC-GG dos revestimentos, verificou-se intenso refinamento de grão. Houve também redução nas medidas de dureza e microdureza. Para ambos os gases de proteção utilizados (Ar+25%He e Ar+4%CO₂) foi possível obter relações de energia com afastamentos positivos. Em todas essas relações a energia da segunda camada foi maior que a energia da primeira camada.

Palavras-chave: Revestimento; Reparo; Dupla camada.

Study of Welding Procedures MIG / MAG for Application of Coatings of Nickel Alloy Inconel 625 to Structural ASTM A387 Gr.11 Steel

Abstract: This work aims to study welding techniques applied to repair of components made of ASTM A387 Gr.11 steel, widely used in the oil and gas industry. Due to the working conditions it is needed use materials having good strength and corrosion resistance. UNS N06625 Ni-based alloy (Inconel 625) was used as the filler metal. MIG / MAG welding process was used to apply the temper bead welding technique with two layers. The methodology of this study was divided in stages, in the first one, exploratory trials were carried out to define the relevance of the studied control factors. In the second step, hardness and microstructure criteria were applied for defining the best heat input relations for the application of the double layer technique. The double layer technique was effective in improving the properties of the microstructure in heat affect zone coatings, it was found intense grain refinement. There was also a reduction in microhardness and hardness measurements. For both used shielding gases (Ar + 25% He and Ar + 4% CO₂) have been achieved heat input relations with positive deviations. In all these relations the heat input of the second layer is greater than the heat input of the first layer.

Key-words: Coating; Repair; Double layer.

1. Introdução

Sabe-se que as condições de trabalho a que são submetidos diversos equipamentos na indústria do petróleo e gás exigem materiais que suportem altas pressões e elevadas temperaturas. O aço ASTM A387 Gr.11, objeto de estudo do presente trabalho, possui as características necessárias para o atendimento das condições de trabalho da indústria, uma vez que tem elevada resistência à corrosão, boa tenacidade, baixo coeficiente de expansão e alta condutividade térmica. Esse aço é largamente utilizado em aplicações em elevadas temperaturas como caldeiras, trocadores de calor, tubulações e tambores de coque [1].

Os tambores de coque representaram a solução para transformar os produtos das torres de destilação, pesados, poluentes e sem preço atrativo no mercado consumidor, em produtos leves e de alto valor agregado. O regime de trabalho do tambor de coque envolve



constante variação de temperatura ao longo de seu comprimento, que o submete à gradientes térmicos, bem como variações de pressão a cada ciclo operacional. Como resultado do regime de trabalho, vários são os problemas que podem surgir e gerar custos para a indústria, caso não sejam previstos e solucionados. São exemplos desses problemas: a fragilização e ataque por hidrogênio, trinca de reaquecimento e, mais gravemente, o surgimento dos “bulges”[1-4]. Como mencionado, os tambores de coque estão sujeitos à esforços devido à pressão interna, seu peso próprio e carregamento em seu ciclo operacional. No entanto, quando na fase de resfriamento, maiores tensões surgem em função da dificuldade em se obter um resfriamento uniforme do tambor, uma vez que o coque age como isolante térmico. Com diferentes temperaturas ao longo de sua extensão, as tensões resultantes são altas e acabam por gerar abaulamentos ou “bulges”, como são conhecidas tais deformidades. De natureza crescente, os bulges devem ser monitorados e analisados de perto. Além disso, reparos são indispensáveis, já que os bulges atuam como focos na formação de trincas e comprometem a vida útil dos equipamentos. Assim, o estudo de técnicas de soldagem aplicadas a reparo, bem como a técnica da dupla camada, que promovam melhoria das propriedades dos aços utilizados nos reatores, de modo a retardar a sua substituição total ou parcial, o que acarretaria dispêndio de tempo e dinheiro, é alvo de muitas pesquisas atualmente e motiva o presente trabalho. Em trabalhos anteriores [5-8] a utilização da técnica da dupla camada mostrou-se vantajosa, uma vez que foi eficaz na obtenção de soldas com boas propriedades mecânicas e dispensou a necessidade de tratamento térmico pós soldagem (TTPS).

A técnica da dupla camada [9,10], investigada nesse trabalho e também utilizada na soldagem de revestimentos, é um procedimento que promove a sobreposição dos ciclos térmicos de soldagem de modo a obter refino e o revenimento da zona afetada pelo calor de granulação grosseira (ZAC-GG) da primeira camada com a deposição da segunda camada. Basicamente é feita a deposição da primeira camada e em seguida aplica-se uma segunda camada de modo que a zona afetada pelo calor de granulação fina (ZAC-GF) da segunda camada sobreponha a ZAC-GG da primeira camada, isto é, a zona macia deve sobrepor a zona dura. A importância da escolha adequada das relações de energias resume-se em garantir aporte térmico suficiente para promover a sobreposição mínima requerida para obter refino e revenimento da ZAC-GG da primeira camada. Alguns parâmetros devem ser observados para que a técnica seja bem-sucedida: a altura média da primeira camada, a profundidade da região de grãos grosseiros e profundidade refinada pela segunda camada. Vale salientar que as temperaturas iniciais e de interpasse devem ser controladas. O sucesso dessa técnica depende do controle desses fatores, isto é, a escolha das energias de cada camada e o controle das temperaturas iniciais e de interpasse determinam a eficácia dessa técnica. A Figura 1 mostra um desenho esquemático de execução da técnica da dupla camada.

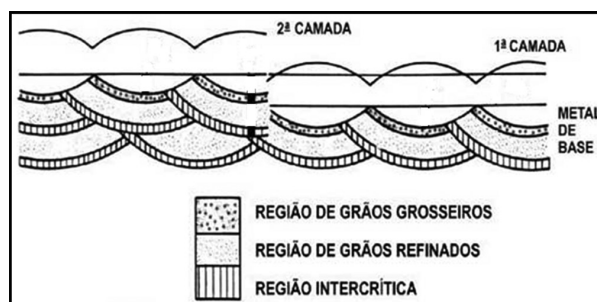


Figura 1. Execução da técnica da dupla camada.

A ferramenta mais comumente utilizada para selecionar as energias de cada camada é o critério de dureza [9]. Em síntese, são obtidas medidas de geometria da seção transversal de cada cordão de solda e, a partir da análise de microdureza, é possível saber qual a extensão das regiões da ZAC. Em outras palavras, o critério de dureza avalia a extensão das regiões macias e duras da ZAC (respectivamente ZM e ZD) de modo que, com auxílio de equações, é possível determinar se haverá a sobreposição requerida da ZAC-GG da primeira camada pela ZAC-GF da segunda camada. A extensão das zonas é determinada da seguinte forma: a zona dura começa na linha de fusão e se estende até a região em que a microdureza corresponde à microdureza do metal base, e a zona macia vai do final da zona dura até a região em que a dureza se iguala à do metal base. A extensão das zonas está exemplificada para o aço ABNT 4140 na Figura 2 [5].

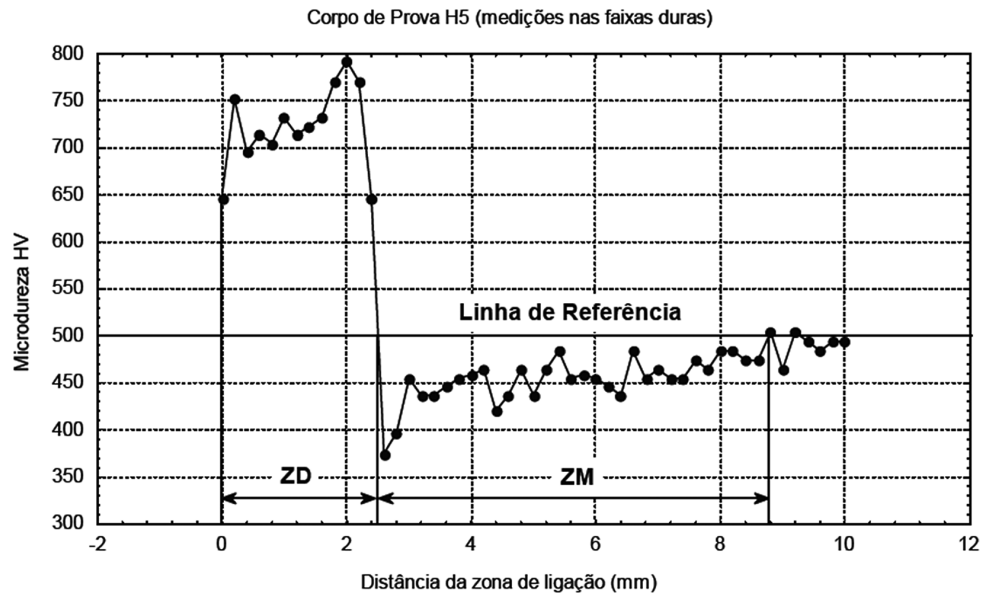


Figura 2. Exemplo de perfil de microdureza mostrando a extensão das zonas macia e dura.

A tomada de decisão para a escolha das energias no critério de dureza tem base nas seguintes equações [10]:

$$PZM2 - R1 - PZD1 < 0 \quad (1)$$

$$R1 + P1 - PZD2 > 0 \quad (2)$$

Onde:

PZM2 = profundidade da zona macia da segunda camada;

PZD1, PZD2 = profundidade da zona dura da 1ª e 2ª camada respectivamente;

R1= reforço da primeira camada;

P1= penetração da primeira camada.

Segundo a Equação 1, primeiro quesito, o aporte térmico que chega a ZM2 deve ser suficiente para permitir que esta tenha maior profundidade que a ZD1 e possa sobrepor a primeira camada, revenindo-a. O segundo quesito, Equação 2, garante que a ZD1 não seja retemperada. O atendimento de ambos os critérios implica que a relação de energia pode ser selecionada para soldagem sem que haja comprometimento da dureza e da tenacidade do material.

O critério de microestrutura é semelhante ao critério de dureza tendo como base a análise microestrutural. Isto é, enquanto o critério de dureza baseia-se nas extensões de ZD e ZM, o critério de microestrutura baseia-se nas extensões da microestrutura da solda, ZACGG e ZACGF. As equações são [10]:

$$PZACGF2 - R1 - PZACGG1 > 0 \quad (3)$$

$$R1 + P1 - PZACGG2 > 0 \quad (4)$$

Onde:

PZACGF2 = profundidade da zona afetada pelo calor com granulação fina da segunda camada;

PZACGG1 = profundidade da zona afetada pelo calor com granulação grosseira da primeira camada;

PZACGG2 = profundidade da zona afetada pelo calor com granulação grosseira da segunda camada;

R1= reforço da primeira camada;

P1= penetração da primeira camada;

A análise desses critérios é feita em um diagrama denominado “diagrama de decisão” [10]. Esse diagrama consolida em uma só análise o critério de dureza e da microestrutura, considerando cada relação de energia. Quando o afastamento, que corresponde ao valor da desigualdade das Equações 1-4, é positivo, significa aprovação e se for negativo, significa reprovação. Com base nessa análise, pretende-se encontrar as melhores relações de energia para soldagem de revestimentos com a técnica da dupla camada aplicada a reparo de modo a obter microestruturas refinadas e com boas propriedades mecânicas.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

O metal base utilizado para este trabalho foi o aço ASTM A387 Gr.11, em blocos nas dimensões especificadas na Figura 3, sendo duas soldagens por bloco (nas faces também mostradas abaixo). A composição química do metal base está disposta na Tabela 1. A liga AWS ERNiCrMo-3 (similar a liga UNS N06625) foi utilizada como metal de adição (ϕ 1,2 mm), com composição química mostrada na Tabela 2.

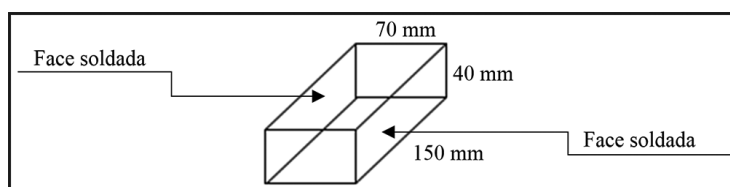


Figura 3. Dimensionamento das peças para soldagem.

Tabela 1. Composição química do aço ASTM A387 (medida e requerida por norma).

| Composição Química Requerida por Norma | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-----------|-----------|---------|--------|-----------|
| Si (%) | P (%) | S (%) | V (%) | Cr (%) | Mn (%) | Fe (%) | Ni (%) | Mo (%) |
| 0,44-0,86 | 0,035 | 0,035 | - | 0,94-1,56 | 0,35-0,73 | Balanço | - | 0,40-0,70 |
| Composição Química Medida | | | | | | | | |
| Si (%) | P (%) | S (%) | V (%) | Cr (%) | Mn (%) | Fe (%) | Ni (%) | Mo (%) |
| 0,55 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 1,58 | 0,52 | 96,5 | 0,11 | 0,56 |

Tabela 2. Composição química da liga AWS ERNiCrMo-3 fornecida pelo fabricante.

| Composição Química Fornecida pelo Fabricante | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Si (%) | P (%) | S (%) | Cr (%) | Mn (%) | Ni (%) | Mo (%) | C (%) | Nb (%) | Fe (%) |
| 0,2 | 0,015 | 0,01 | 22,0 | 0,2 | 60,0 | 9,0 | 0,03 | 3,4 | 5,0 |

As misturas gasosas utilizadas foram: Ar + 25% He e Ar + 4% CO₂, sendo que buscou-se avaliar a influências das propriedades dos gases (inerte e ativo) levando em conta molhabilidade, perfil de geometria, estabilidade do arco e transferência metálica.

2.2. Procedimento experimental

2.2.1. Etapa 1: ensaios exploratórios

Esta etapa tem como objetivo avaliar a influência dos fatores de controle estudados nas variáveis resposta. Os fatores de controle em análise, bem como as variáveis resposta, estão dispostos na Tabela 3:

Tabela 3. Fatores de controle e variáveis resposta contemplados nos ensaios exploratórios.

| ENSAIOS EXPLORATÓRIOS | |
|---|----------------------|
| FATORES DE CONTROLE | VARIÁVEIS RESPOSTA |
| Técnica de Oscilação (2 níveis): sem tecimento e com tecimento triangular | Reforço |
| Energia de Soldagem (4 níveis): 0,8, 1,2, 1,6 e 2,0 kJ/mm | Penetração |
| Gás de Proteção (2 níveis): argônio + 25% He e argônio + 4% CO ₂ | Largura |
| Técnica da Tocha (3 níveis): normal, puxando (15°) e empurrando (15°) | Diluição |
| Técnica da Energia (2 níveis): tipo I e tipo V | Ângulo de Molhamento |

Foram soldados cordões em simples deposição (processo MIG/MAG com fonte operando no modo corrente constante) e em seguida foi removida uma amostra de cada cordão para que sua seção transversal, após preparação metalográfica, pudesse ser avaliada em termos das variáveis resposta consideradas. Adotou-se a seguinte legenda para representar as condições: N = liga de níquel (AWS ERNiCrMo-3); 08, 12, 16 e 20 = as energias de soldagem (0,8, 1,2, 1,6 e 2,0 kJ/mm); ST = sem tecimento; CT = com tecimento; G1 = gás 1 (Ar + 25%He) e G2 = gás 2 (Ar + 4%CO₂).

Os parâmetros de soldagem utilizados estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem utilizados.

| Ar + 4%CO ₂ | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|-----------|---------------|----------------|--------|-----------|
| Im (A) | Ief (A) | Ip (A) | tp (s) | Ib (A) | tb (s) | DBCP (mm) | Valim (m/min) | V sold (m/min) | Um (V) | E (kJ/mm) |
| 166,67 | 191,49 | 300 | 3 | 100 | 6 | 20 | 5,5 | 0,35 | 29 | 0,85 |
| 230 | 230 | 230 | - | - | - | 20 | 7,5 | 0,35 | 32 | 1,26 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 8,8 | 0,35 | 36 | 1,67 |
| 310 | 300 | 300 | - | - | - | 20 | 10 | 0,35 | 38 | 1,95 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 8,8 | 0,65 | 36 | 0,86 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 8,8 | 0,48 | 36 | 1,22 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 8,8 | 0,35 | 36 | 1,67 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 8,8 | 0,28 | 36 | 2,08 |
| Ar + 25%He | | | | | | | | | | |
| Im (A) | Ief (A) | Ip (A) | tp (s) | Ib (A) | tb (s) | DBCP (mm) | Valim (m/min) | V sold (m/min) | Um (V) | E (kJ/mm) |
| 165,38 | 193,65 | 300 | 2,8 | 90 | 5 | 20 | 5,9 | 0,35 | 29 | 0,87 |
| 230 | 230 | 230 | - | - | - | 20 | 8,5 | 0,35 | 32 | 1,26 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 9,7 | 0,35 | 35 | 1,62 |
| 300 | 300 | 300 | - | - | - | 20 | 11,3 | 0,35 | 38 | 2 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 9,7 | 0,65 | 35 | 0,87 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 9,7 | 0,45 | 35 | 1,26 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 9,7 | 0,35 | 35 | 1,62 |
| 270 | 270 | 270 | - | - | - | 20 | 9,7 | 0,28 | 35 | 2,03 |

A partir dos resultados dos ensaios exploratórios, os fatores de controle que mostraram influência nas variáveis resposta seguiram em estudo para segunda etapa do trabalho, com a aplicação do critério de dureza e do critério de microestrutura.

2.2.2. Etapa 2: aplicação do critério de dureza e do critério de microestrutura

Foram soldados cordões em simples deposição nas peças com as dimensões mencionadas, foi feito um pré-aquecimento de 175°C. Após as soldagens, foram removidas amostras para avaliação da seção transversal por meio de caracterização metalográfica. Foram feitas três linhas de microdureza para cada amostra, como mostrado na Figura 4.

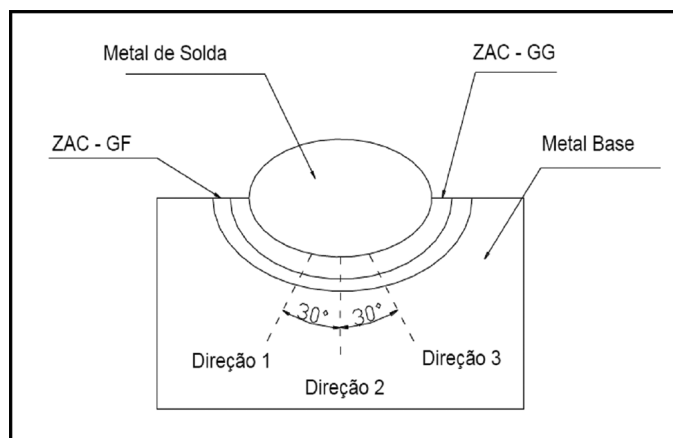


Figura 4. Direção das linhas de microdureza feitas em cada amostra.

A carga aplicada nos ensaios de microdureza foi de 100g por 10s. O espaçamento entre impressões foi de 0,20mm. Em cada linha foram feitos 40 pontos, sendo 4 no metal de solda, 1 na interface e 35 na ZAC e no metal base. Foram realizadas medições de extensões das regiões da ZAC via microscopia ótica (critério de microestrutura, Figura 5a) e via perfis de microdureza (critério de dureza, Figura 5b). Esses dados foram apresentados na forma de gráficos aplicando as Equações 1-4, conforme os diagramas de decisão. Assim, foi possível analisar os critérios de dureza e de microestrutura para a escolha das relações de energia para soldagem da dupla camada.

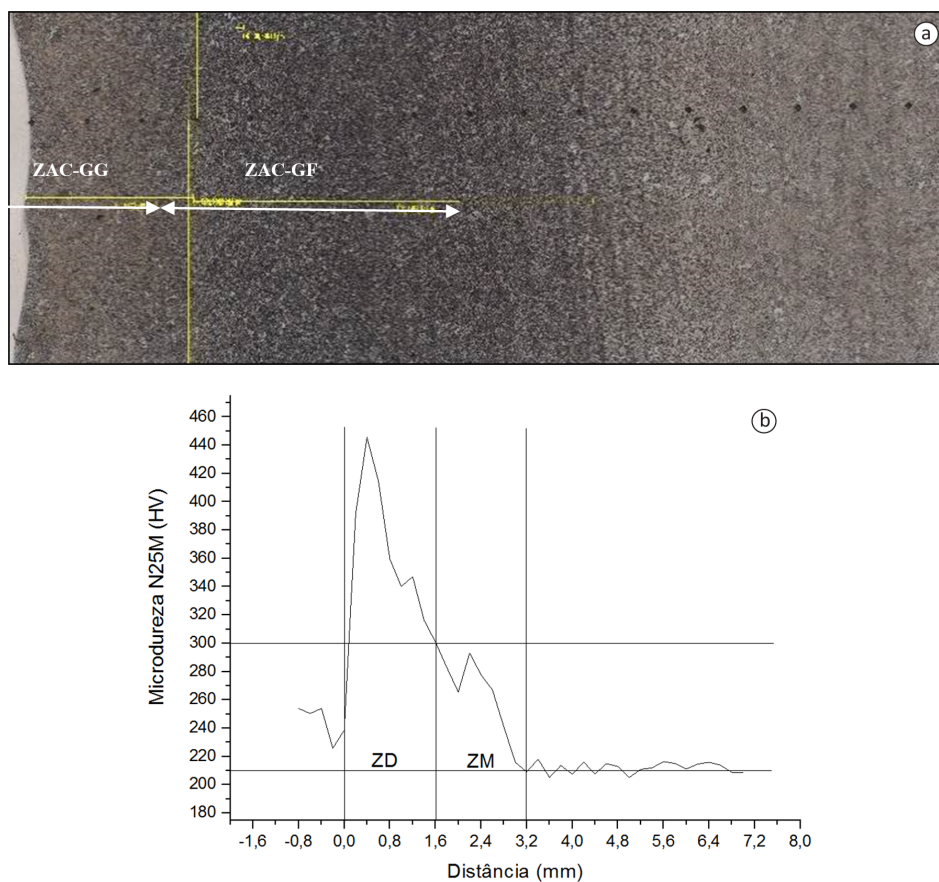


Figura 5. Medição das extensões das regiões da ZAC segundo o critério de (a) microestrutura e (b) dureza.

Após a escolha das melhores relações de energia de soldagem, com base nos diagramas de decisão, foram soldados 2 revestimentos. Para comprovação da eficácia da técnica da dupla camada esses revestimentos foram submetidos a ensaio de dureza e microdureza bem como análise microestrutural.

3. Resultados e Discussão

3.1. Ensaios exploratórios

Para avaliar a influência dos fatores de controle foi feita análise estatística ANOVA com o software STATISTICA. Os dados foram apresentados na forma de gráficos que permitiram analisar a significância (p) desses fatores para as variáveis resposta. Para que um fator de controle tenha influência estatística, considera-se que a significância deve ser inferior à 0,05. Dentre os fatores de controle estudados (técnica de oscilação, energia de soldagem, gás de proteção, técnica da tocha e técnica da energia), a energia de soldagem (Figura 6) mostrou ser significativa na penetração e no reforço (os valores de p foram 0,00012 e 0,04, respectivamente). A técnica de oscilação (Figura 7), embora não tenha influenciado consideravelmente (valores de p de 0,13 e 0,22 para largura e reforço, respectivamente), mostrou uma tendência importante e que pode ser explorada na soldagem de revestimentos com a técnica da dupla camada.

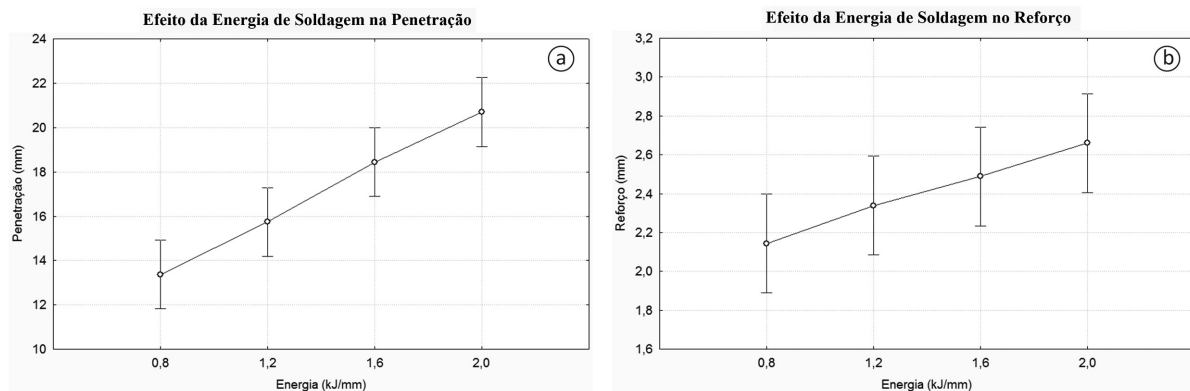


Figura 6. (a) Influência da energia de soldagem na penetração e (b) Influência da energia de soldagem no reforço.

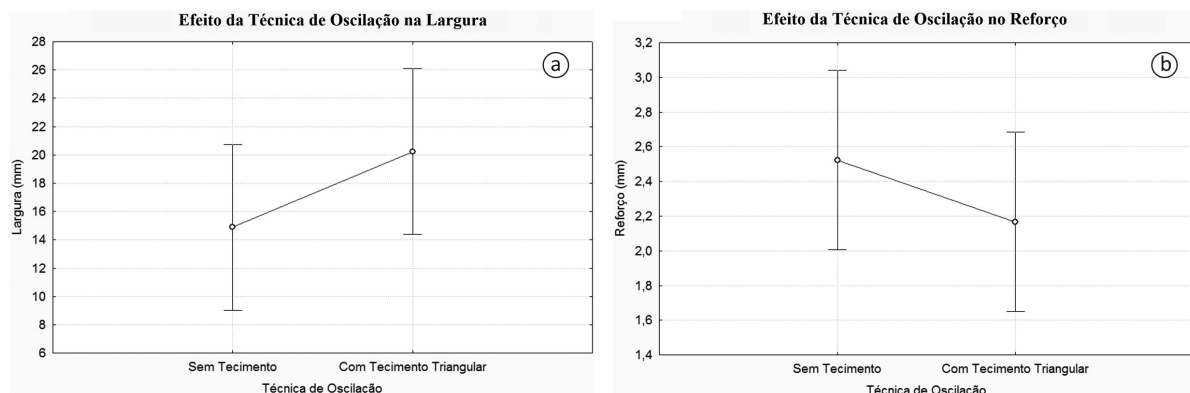


Figura 7. (a) Influência da técnica de oscilação na largura e (b) Influência da técnica de oscilação no reforço.

Como esperado, o aumento da penetração (Figura 6a) ocorre devido ao aumento da corrente de soldagem, pois há maior quantidade de calor fornecida ao sistema. O aumento do reforço (Figura 6b) é atribuído ao maior volume de metal fundido.

Para uma mesma condição de soldagem, o tecimento promoveu maior espalhamento do material depositado. Levando em consideração que a quantidade de material depositado é a mesma com e sem tecimento, o maior espalhamento promove aumento de largura e, conseqüentemente, o reforço diminui (Figura 7a, b). Esse também é um resultado esperado e foi obtido em estudo anterior [11].

Quanto a influência do gás de proteção, não houve necessidade da realização de ensaios exploratórios, pois esse é um fator de controle que não pode ser desconsiderado para a etapa seguinte, uma vez que se sabe que a composição do gás influencia nos parâmetros de soldagem (tensão) e na geometria do cordão (largura, molhabilidade, penetração, reforço). Assim, esses três fatores de controle seguiram em estudo para a etapa do critério dureza e de microestrutura. Os demais fatores de controle não influenciaram de forma significativa as variáveis resposta. Desta forma, com base no aspecto visual (ausência de defeitos), decidiu-se seguir para a próxima etapa mantendo a técnica da técnica da tocha como “normal”, isto é, a tocha perpendicular à peça e a técnica da energia como tipo I, uma vez que essa técnica tem mais influência na extensão das ZAC's das soldas.

3.2. Aplicação do critério de dureza e do critério de microestrutura

A Figura 8 mostra os diagramas de decisão para o gás Ar + 25%He. As condições em destaque representam as melhores relações de energia para soldagem da dupla camada.

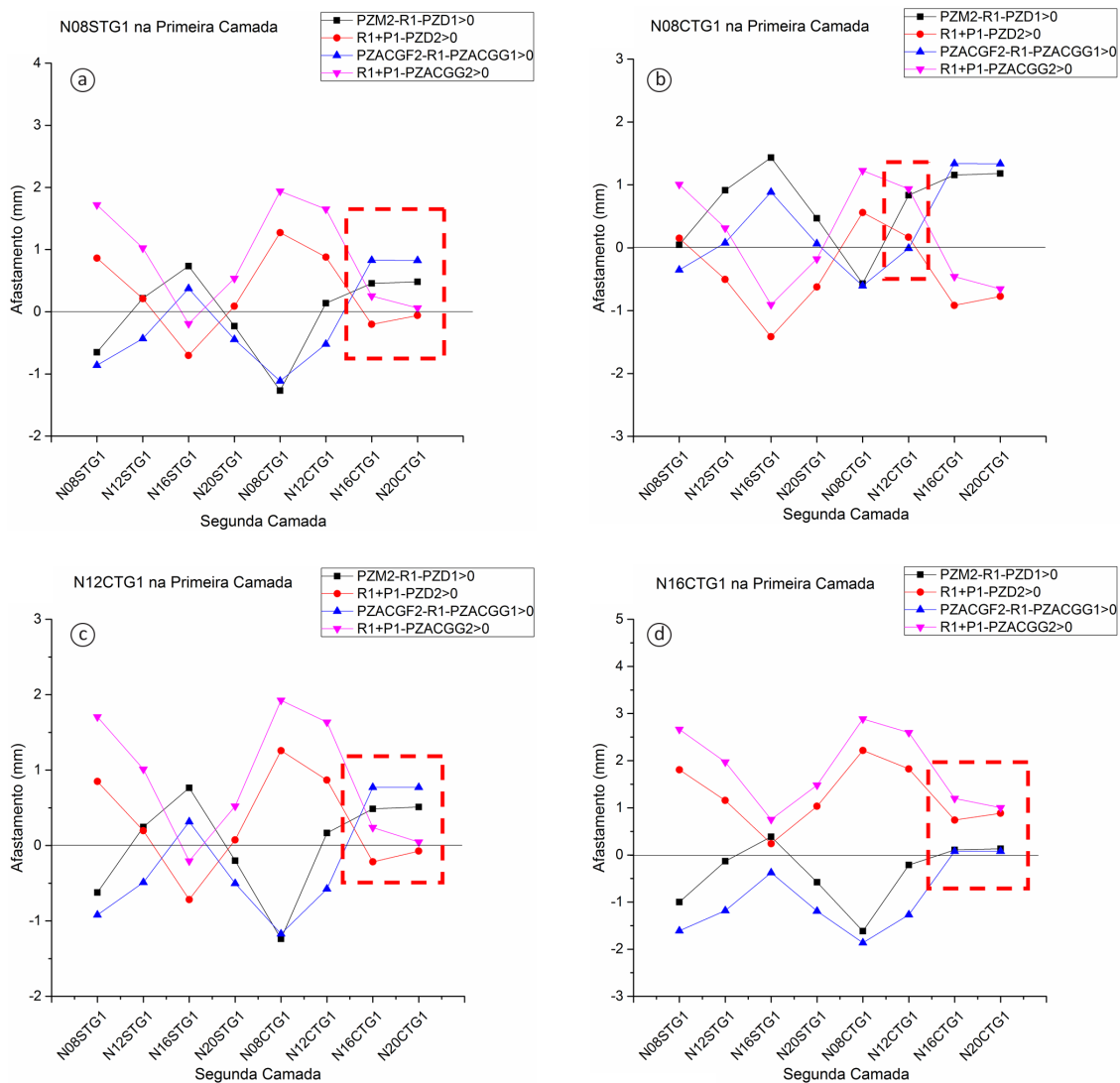


Figura 8. Diagramas de decisão para o gás Ar + 25%He.

Observou-se que, para ambos os critérios, na condição sem tecimento (Figura 8a) as melhores as relações foram: 08ST16CT e 08ST/20CT. Na análise dos diagramas de decisão considera-se que as melhores relações de energia apresentam afastamento positivo e quanto mais positivo, melhor. Notou-se que quando a energia da primeira camada foi menor que a energia da segunda, foram obtidas as melhores relações, isso porque quanto maior a energia da primeira camada, maior será a extensão da ZAC-GG, fazendo com que seja mais difícil sobrepor essa região [5,8]. Também foi possível observar que quanto maior a energia da primeira camada, maior a tendência de afastamentos negativos (reprovação).

Para as condições com tecimento (Figura 8b até 8d) as mesmas tendências são observadas. Algumas boas relações foram obtidas, sendo que as melhores relações foram: 08CT/12CT, 12CT/16CT, 12CT/20CT, 16CT/16CT e 16CT/20CT. O tecimento promoveu redução do reforço e da penetração, a profundidade da zona dura e zona macia também diminuíram. Em função disso, o primeiro quesito de dureza (Equação 1) e o primeiro quesito de microestrutura (Equação 3) resultam em afastamentos maiores em comparação com as mesmas condições sem tecimento, esses resultados também foram encontrados em estudos anteriores [8,11]. No entanto, as Equações 2 e 4 (segundo quesito de dureza e microestrutura) resultaram em afastamentos menores. Novamente, as melhores relações de energia resultaram de uma maior energia na segunda camada em relação à primeira. Quanto aos resultados para o gás Ar + 4%CO₂ (Figura 9), em geral, as mesmas tendências foram observadas.

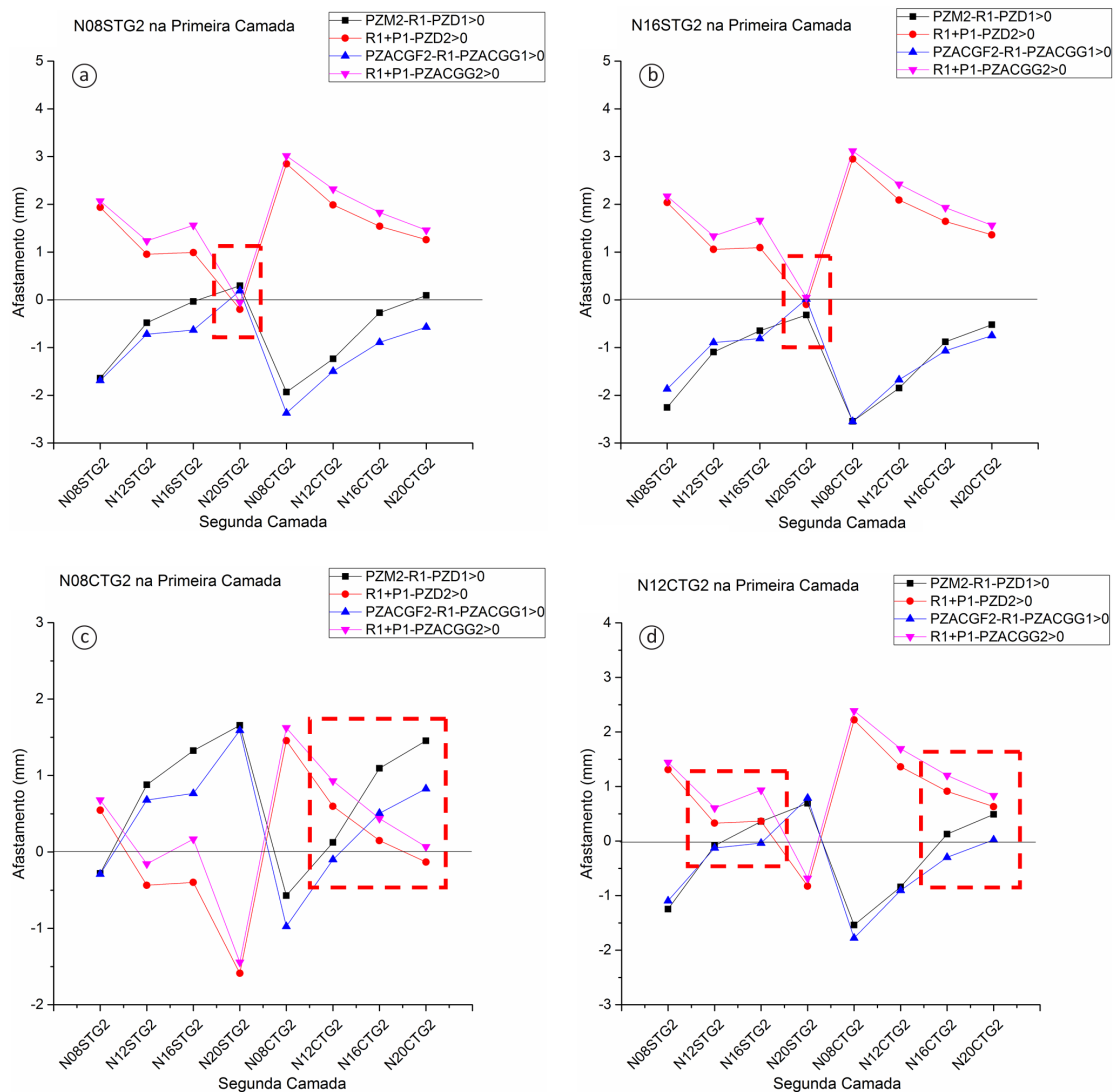


Figura 9. Diagramas de decisão para o gás Ar + 4%CO₂.

Como esperado, as características geométricas dos cordões foram diferentes em relação às obtidas com Ar + 25%He (Figura 10) e isso reflete nos afastamentos. Com Ar + 4%CO₂ a molhabilidade foi menor e a penetração foi significativamente maior, porém em relação ao reforço, os gases não contribuíram de forma significativa na variação de suas dimensões (Tabela 5). Sendo a penetração com Ar + 4%CO₂ maior, não seria ideal ter esse gás na primeira camada, pois a ZAC-GG ou zona dura teriam uma extensão grande e, conseqüentemente, difícil de sobrepor e revenir com uma segunda camada. Entretanto, para determinadas combinações, foi possível obter algumas relações de energia satisfatórias: 08ST/20ST, 16ST/20ST, 08CT/16ST, 08CT/12CT, 08CT/16CT, 08CT/20CT, 12CT/12ST, 12CT/16ST, 12CT/16CT, 12CT/20CT. Para ambos os gases, mais possíveis relações satisfatórias foram obtidas quando a primeira camada teve tecimento.

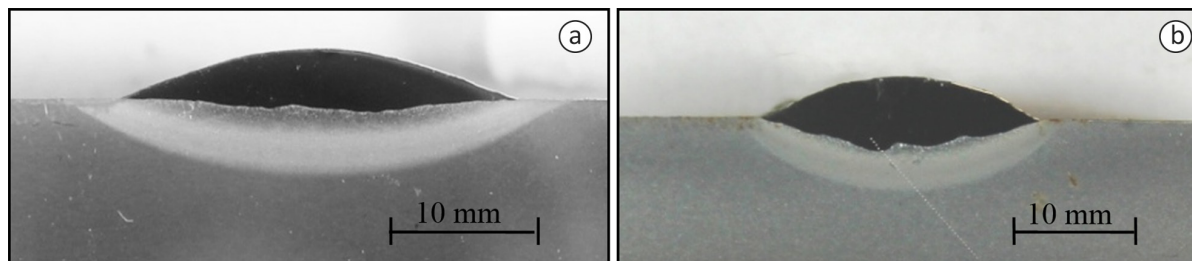


Figura 10. Macrografia de um cordão de solda (a), com Ar + 25%He e (b) soldado com Ar+ 4%CO₂.

Tabela 5. Medidas de geometria da seção transversal dos cordões soldados com ambos os gases.

| Condição | Reforço (mm) | Largura (mm) | Penetração (mm) |
|-------------|--------------|--------------|-----------------|
| N08CTG1 (a) | 1,9 | 15,3 | 0,5 |
| N08CTG2 (b) | 2,1 | 13,5 | 1,6 |

Foram selecionadas duas relações de energia para soldagem dos revestimentos, sendo uma de cada gás. As relações de energia selecionadas foram: N08CTG1/ N12CTG1 (gás Ar+25%He) e N08CTG2/ N16CTG2 (gás Ar+4%CO₂). Esses revestimentos foram nomeados como N1 e N2, respectivamente. De modo geral, não foram verificadas instabilidades durante a soldagem dos revestimentos. A seção transversal dos revestimentos soldados mostra uma interface livre de defeitos entre os passes (Figura 11).

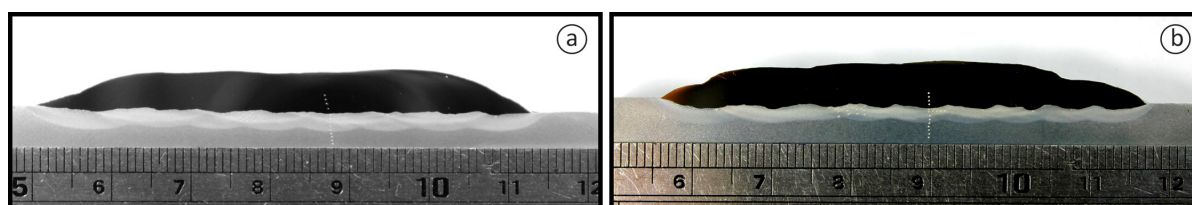


Figura 11. Seção transversal dos revestimentos N1 (a) e N2 (b).

Iniciando a análise da ZAC-GG dos revestimentos a nível microscópico, na (Figura 12a, b) está exemplificada a microestrutura da região interfacial no centro e na extremidade, respectivamente, encontrada de modo geral nos revestimentos. É importante ressaltar que na extremidade dos revestimentos (início e fim) não há atuação da técnica da dupla camada, pois a correta sobreposição de passes não é garantida. A eficácia da técnica pode ser assegurada mais especificamente a partir do terceiro cordão da segunda camada, uma vez que a sobreposição se estabiliza. A microestrutura encontrada na ZAC foi composta basicamente por bainita e martensita revenida [12]. Observa-se que, no centro dos revestimentos, mesmo nas regiões mais próximas da linha de fusão, há um alto

grau de refinamento em relação à região próxima da linha de fusão nas extremidades dos revestimentos (onde os grãos apresentaram granulação grosseira), isto é, essa região não foi submetida ao ciclo térmico da segunda camada, como relatado na literatura [13].

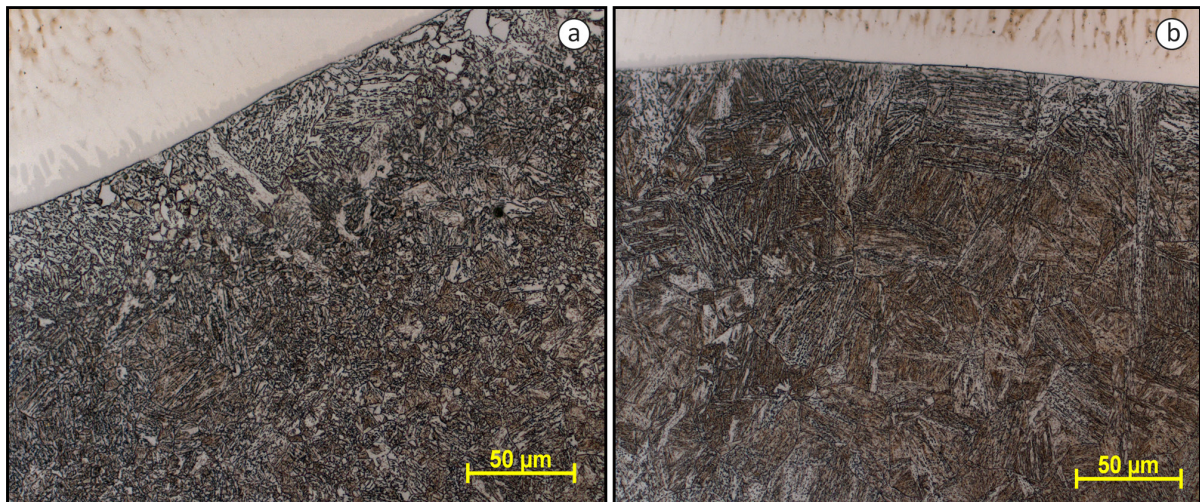


Figura 12. Microestrutura encontrada na interface dos revestimentos na região central (a) e nas extremidades (b).

Associados à microestrutura, perfis de microdureza das regiões centrais dos revestimentos foram comparados com perfis de microdureza nas extremidades. A Figura 13 mostra os perfis obtidos.

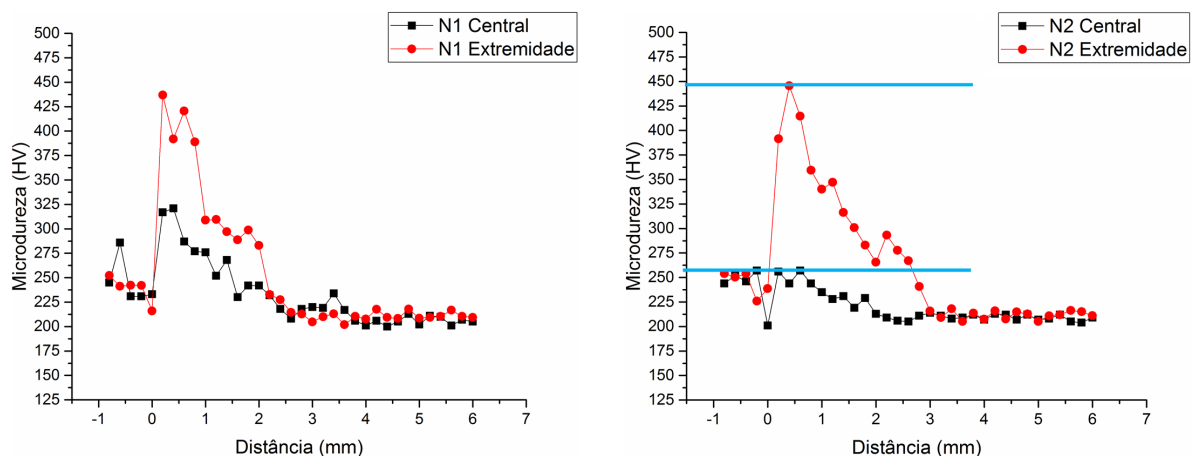


Figura 13. Perfis de microdureza no centro e extremidade dos revestimentos soldados.

Os resultados mostrados comprovam a eficácia da técnica da dupla camada. Como pode ser observado, o pico de microdureza na região submetida à técnica da dupla camada é inferior ao pico obtido nas extremidades do revestimento para ambos os revestimentos. No revestimento N2, por exemplo, os valores máximos de microdureza obtidos na extremidade do revestimento (onde não há atuação garantida da técnica da dupla camada) são da ordem de 450 HV a 0,5 mm da interface. Já na região central do revestimento (região a partir do terceiro cordão, onde a eficácia da técnica é garantida), os valores máximos obtidos são da ordem de 250 HV (indicados pelas retas em azul). Para o revestimento N1 a redução da medida de microdureza foi de 450 para 325 HV, isto é, também foi bastante significativa.

Na Figura 14 são apresentados os valores de dureza para as condições soldadas e esses valores são comparados aos valores de dureza obtidos nas extremidades dos revestimentos. No que diz respeito a dureza, o valor máximo encontrado na extremidade dos revestimentos foi da ordem de 330 HV. Na região central dos revestimentos o valor máximo foi da ordem de 260 HV (revestimento N1).

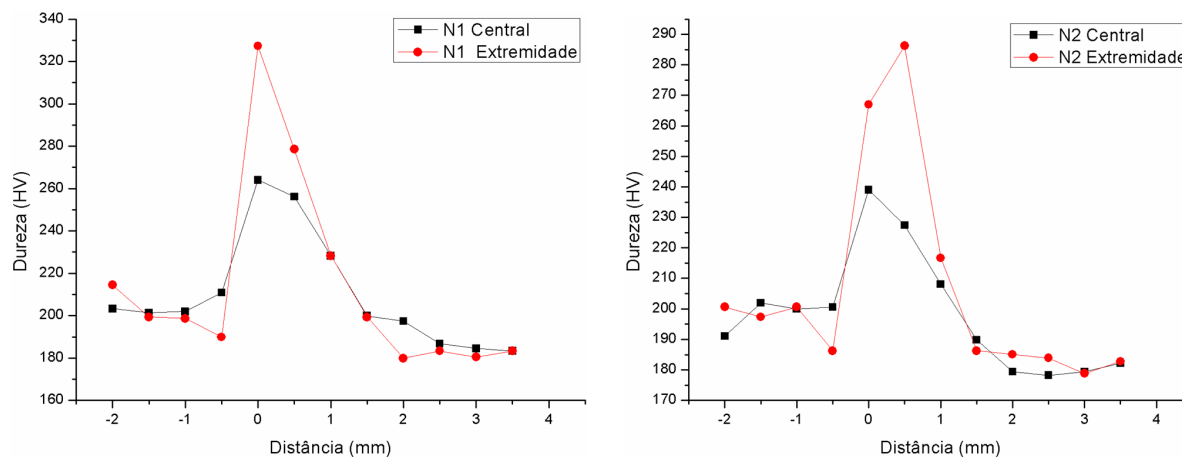


Figura 14. Perfis de dureza encontrados no centro e na extremidade dos revestimentos.

Ainda analisando a dureza, destaca-se também o resultado obtido no revestimento N2, para o qual o valor máximo encontrado na extremidade do revestimento foi da ordem de 290 HV. Observando o resultado da dureza na região central desse revestimento, esse valor foi reduzido para valores da ordem de 240 HV, houve redução considerável nos níveis de dureza. Como pôde ser observado, os níveis de refinamento encontrados nas ZAC-GG das amostras soldadas com a técnica da dupla camada foram significativos. Portanto, ficou evidente a eficácia da técnica da dupla camada na obtenção de microestruturas mais refinadas e com menores valores de dureza e microdureza.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, relacionam-se as seguintes conclusões:

- O diagrama de decisão permitiu identificar adequadamente as melhores relações de energia para aplicação da técnica de dupla camada, fornecendo uma análise concisa e bastante útil na seleção dessas relações de energia;
- Concluiu-se que quando a energia da primeira camada foi menor que a energia da segunda, foram obtidas as melhores relações de energia;
- Para as soldagens com o gás Ar + 25%He as melhores relações de energia foram: 08ST/16ST, 08ST/20ST, 08CT/12CT, 12CT/16CT, 12CT/20CT, 16CT/16CT e 16CT/20CT;
- Ficou claro que quanto maior a energia da primeira camada, maior a tendência de afastamentos negativos (reprovação), pois maior será a ZD ou ZAC-GG;
- Com o tecimento o primeiro quesito de dureza (Equação 1) e o primeiro quesito de microestrutura (Equação 3) resultaram em afastamentos maiores em relação às mesmas condições sem tecimento. No entanto, as Equações 2 e 4 (segundo quesito de dureza e microestrutura) resultaram em afastamentos menores;
- Para as soldagens com o gás Ar + 4%CO₂ as melhores relações foram: 08ST/20ST, 16ST/20ST, 08CT/16ST, 08CT/12CT, 08CT/16CT, 08CT/20CT, 12CT/12ST, 12CT/16ST, 12CT/16CT, 12CT/20CT 08ST/20ST, 16ST/20ST;

- A técnica da dupla camada se mostrou eficaz na melhora das propriedades da microestrutura da ZAC-GG dos revestimentos uma vez que intenso refinamento foi percebido;
- As relações de energia apontadas pelo diagrama de decisão e selecionadas para soldagem dos revestimentos N1 e N2 (08CT/12CT e 08CT/16CT, respectivamente) proporcionaram a obtenção de microestruturas com significativa redução dos valores de dureza e microdureza da ZAC-GG em comparação às regiões onde não houve atuação da técnica da dupla camada.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao LPTS (Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem) pelo apoio na realização das atividades práticas e à Petrobras pelo suporte financeiro.

Referências

- [1] Guimarães AF. Caracterização microestrutural e mecânica do aço 1,25Cr-0,5Mo submetido por longo período a alta pressão e elevada temperatura [dissertação de mestrado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2011.
- [2] Oliveira SP, Miranda PEV. Caracterização crítica de hidrogênio para a fragilização de hidrogênio em aços. *Revista Matéria*. 2000;5:1-14.
- [3] Schlo SM, Svoboda J, Giessen EVD. Evolution of the methane pressure in a 2.25Cr–1Mo steel during hydrogen. *Acta Materialia*. 2001;49:2227-2238.
- [4] Kou S. *Welding metallurgy*. New York: John Wiley & Sons; 1987.
- [5] Aguiar WM. Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior [dissertação de mestrado]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2001.
- [6] Teixeira JCG, Pope AM. Técnica de deposição em dupla camada para reparos e modificações sem tratamento térmico pós-soldagem de Aço 1 Cr-0.5Mo. *Soldagem e Materiais*. 1992;4(2):23-27.
- [7] Friedman LM, Bailey N. Development and assessment of procedures for repair welding of CrMo steels without PWHT. 1992. Final Report. Document 36085-23-91.
- [8] Nunes EB. Aplicação da técnica da dupla camada sem TTPS para a soldagem do aço ABNT 4140 empregando os testes de Higuchi convencional e modificado. *Anais do XXXIII Congresso Nacional de Soldagem – CONSOLDA*; 2007 Agosto 28; Caxias do Sul, Brasil. 2007.
- [9] Higuchi M, Sakamoto H, Tanioka S. A study on weld repair through half bead method. *IHI Engineering Review*. 1980;13(2):14-19.
- [10] Miranda HC. Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem dos aços ABNT 516 Gr. 70. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2009. 128 p.
- [11] Oliveira GLG. Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas [tese de doutorado]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2013.
- [12] Bhadeshia HKDH. *Bainite in steels: transformation, microstructure and properties*. 2. ed. London: IOM Communications Ltd; 2001.
- [13] Modenesi PJ, Marques PV, Santos DB. Curso de introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 1992.