

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

ESTUDO PARA QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE
REVESTIMENTO EM AÇO CARBONO UTILIZANDO MONEL COMO
METAL DE ADIÇÃOFelipe David Ramos Barreto¹Rudson Moreira Santos²Orientador: Prof. M.Sc. Paulo Roberto Rego³

RESUMO

É comum na indústria petroquímica a utilização de equipamentos e acessórios de aço carbono com aplicação de revestimento anticorrosivo à base de ligas de níquel. Ocorre que tal prática é bastante utilizada na construção e montagem de equipamentos novos, não existindo muitas pesquisas sobre tal procedimento aplicado às atividades de manutenção e reparo em campo para alguns equipamentos específicos. Este artigo busca avaliar a qualidade de uma solda de revestimento num substrato de aço carbono com adição de metal monel buscando uma proteção anticorrosiva, simulando uma soldagem de reparo em campo. Para isso foram confeccionados corpos de prova e a soldagem foi realizada através da técnica de eletrodo revestido. Foram realizados os procedimentos conforme preconizados no código ASME IX, tais como, inspeções, ensaios não destrutivos e ensaio mecânico de dobramento. Além disso, foram realizados também os ensaios de análise química, microscopia óptica e microdureza Vickers com a finalidade de caracterizar o material pós soldagem. Desta forma dados foram obtidos onde foi possível perceber que a aplicação e reposição deste revestimento em campo pode manter a confiabilidade e segurança tal qual um equipamento novo, bem como uma RQPS e posterior EPS podem ser elaboradas para este tipo de soldagem.

Palavras-Chave: soldagem de revestimento; soldagem de metal monel; *overlay*.

1 INTRODUÇÃO

Devido à corrosividade de alguns ácidos, dentre eles o HF (ácido fluorídrico) que é comumente utilizado como catalizador no processo de alquilação nos processos das plantas químicas e petroquímicas, vem-se utilizando conexões e acessórios de tubulação de aço carbono estrutural como, por exemplo, o ASTM A105 com revestimento anticorrosivo na parte interna e faces de vedação com ligas de cobre/níquel 400, também chamada de metal monel. Isso ocorre devido a tais componentes, quando aplicados em

¹ Engenheiro Mecânico – UNIFACS. E-mail: eng.felipedavid@gmail.com

² Engenheiro Mecânico – UNIFACS. E-mail: rudson.santos@bol.com.br

³ Engenheiro Mecânico – UFBA. Mestre em Metalurgia. E-mail: pauloregosilva37@outlook.com

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

linhas de HF, estarem sujeitos ao mecanismo de dano denominado como corrosão ácida, onde no meio aquoso há formação de íons H^+ o qual pode ser extremamente deletério caso se utilize componentes de aço carbono sem revestimento anticorrosivo. Da Silva Telles (2003) afirma que o metal monel é a liga a base de níquel com maior emprego em equipamentos de processo, sendo bastante utilizado como revestimento anticorrosivo sobre chapas de aço-carbono ou aços baixos liga.

A aplicação do revestimento normalmente é realizada na fabricação dos equipamentos através de processos de soldagem os quais requerem o uso de consumíveis com teor de níquel suficiente para que se obtenha a característica de maior resistência à corrosão. Ocorre que tal operação pode não ser uma prática tão comum na manutenção dia a dia da indústria petroquímica, visto à dificuldade em muitos casos de se realizar o revestimento por soldagem em campo necessitando sempre de um procedimento de reparo específico e qualificado, uma vez que o objetivo é unir dois metais com composições químicas diferentes. Desta forma a aplicação do revestimento fica um tanto quanto limitada no que se refere a atividades de reparo.

2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho visa especificar um procedimento de soldagem de revestimento anticorrosivo que possa ser aplicado nas operações de manutenção e reparo em campo, garantindo confiabilidade e segurança, bem como reduzir os custos atrelados a paradas de manutenção não programadas. Além disso, não existem muitos estudos e/ou procedimentos qualificados no tocante a aplicação de revestimento de monel através do eletrodo revestido em flanges.

3 OBJETIVOS

3.1. Objetivos Gerais

O objetivo deste estudo é realizar uma soldagem de revestimento (*weld overlay*) em aço carbono, empregando como metal de adição uma liga de metal monel visando garantir a proteção anticorrosiva necessária sem a formação de defeitos e descontinuidades, as quais podem ocorrer durante o processo de solidificação. Para isso a soldagem foi realizada em dois corpos de prova, sendo um com eletrodo de diâmetro de 2,5mm e o outro com 3,25mm, a técnica adotada é o eletrodo revestido.

3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a soldabilidade do metal monel em aço carbono relacionando-a aos parâmetros de soldagem utilizados;
- Analisar a composição química da solda;

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

- Avaliar a formação de descontinuidades e defeitos da deposição, através da realização de ensaios não destrutivos;
- Avaliar a dureza posterior à soldagem no metal de base (MB), zona de interface e metal de solda (MS);
- Concluir se é possível elaborar uma RQPS e posterior EPS deste processo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Níquel e Suas Ligas

“Tanto o níquel como as suas ligas são materiais que apresentam, simultaneamente, excepcional resistência à corrosão e muito boas qualidades mecânicas e de resistência às temperaturas tanto altas como baixas.” (DA SILVA TELLES, 2003, p. 181). Por apresentar uma estrutura cristalina CFC – Cúbica de Face Centrada – até o limite do seu ponto de fusão, o níquel e suas ligas não possuem transição dúctil-frágil podendo ser utilizados tanto em altas quanto baixas temperaturas. Outro ponto importante é a similaridade entre o níquel e o ferro, onde o primeiro é ligeiramente mais denso, porém, as características mecânicas são bem parecidas (WANG, 2016). Tal fator implica na boa soldabilidade entre o aço carbono e ligas de níquel. Em resumo, o níquel puro bem como as ligas de níquel-cobre possui soldabilidade similares. (WANG, 2016).

Kou (2003), aponta algumas questões importantes sobre a soldabilidade das ligas de níquel quando da presença de elementos residuais, tais como, enxofre, chumbo, zircônio, boro, fósforo e bismuto. Tais elementos são por natureza insolúveis no níquel podendo propiciar eventuais trincas na solidificação da junta soldada em função de reações eutéticas.

As ligas a base de níquel são extensivamente utilizadas numa alta e variada gama de aplicações em diversos segmentos industriais em virtude de, entre muitos fatores, aliar excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão, inclusive a altas temperaturas (1100°C). Tais ligas são comumente soldadas com processos tradicionais como, por exemplo, TIG e ER, onde a definição do processo será muito em função das características que se deseja obter, bem como, disponibilidade de material e mão de obra (KOU, 2003).

4.2 Metal Monel

Segundo Da Silva Telles (2003, p. 183), “O metal monel é uma solução sólida níquel-cobre em tais proporções que o tornam mais resistentes do que o níquel em meios redutores e mais resistentes que o cobre em meios oxidantes.” Sua resistência mecânica também é superior ao níquel, podendo ser aumentada pelo processo de encruamento.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

O metal monel é amplamente utilizado em meios corrosivos em contato com cloro, bromo, flúor, hidrogênio, solventes clorados e ácidos diluídos e em contato com atmosfera, água e vapor praticamente não há corrosão. Com ácido fluorídrico não-aerado, situação proposta neste trabalho, a corrosão é insignificante em quaisquer condições de temperatura e de concentração (DA SILVA TELLES, 2003).

Um ponto negativo no metal monel assim como nas ligas de níquel em geral está no seu elevadíssimo custo quando comparado aos metais mais usuais, o que tenta a limitar muito a sua aplicação restringindo-a somente em casos de extrema necessidade e/ou para equipamentos críticos.

Os eletrodos de metal monel são comumente utilizados na soldagem das ligas monel 400, em revestimentos de aço ao carbono e soldagens dissimilares entre as ligas níquel-cobre com aço de baixa liga, ligas cobre-níquel e cobre.

4.3 Código ASME

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a instituição que regulamenta os ensaios, testes e fabricação de diversos equipamentos industriais. As normas internacionais, porém, em especial as da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) são largamente empregadas e aceitas na fabricação de diversos equipamentos aplicados nas indústrias químicas e petroquímicas, dentre eles, tubulações e vasos de pressão, dentre as quais duas são bastante usadas no Brasil:

- ASME SECTION IX: Qualificação de Soldagem, Brasagem e Fusão – Qualificação de soldadores, operadores e procedimentos de soldagem.
- ASME B31.3: Tubulação de Processos – Tubulações de processos industriais e acessórios.

O código ASME SECTION IX regulamenta desde a concepção dos corpos de prova até os ensaios, inspeções e critérios de aprovação da solda, sendo ela com objetivo de união, revestimento anticorrosivo e/ou *cladding*. De acordo ao código ASME IX no item QW-214.2, uma chapa de teste deve possuir 150 mm de comprimento no mínimo de modo que seja possível retirar corpos de prova para proceder com os ensaios de dobramento e tração descritos no código. A região com a solda de revestimento deve ter no mínimo 38 mm de largura por 150 mm de comprimento. A espessura da chapa teste, que será usada neste estudo, terá no máximo 19 mm. Ainda segundo o código, mais precisamente no item QW-211, o formato da peça não é considerado como uma variável essencial na qualificação de um procedimento de soldagem, podendo a peça ser em formato de chapa ou tubo.

O parágrafo QW-194 do código ASME IX especifica uma inspeção visual pós-soldagem com o intuito de se identificar eventuais defeitos e/ou discontinuidades

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

decorrentes do processo. Adicionalmente, também deve ser realizado o ensaio de líquidos penetrantes (QW-195) com o intuito de encontrar possíveis descontinuidades as quais não foram identificadas no ensaio visual. A norma considera uma indicação relevante aquela em que suas dimensões têm no mínimo 1,5 mm. Assim é inaceitável a detecção de:

- Indicações lineares relevantes, isto é, um defeito linear em que seu comprimento é maior do que três vezes a sua largura;
- Indicações arredondadas relevantes maiores do que 5 mm. Indicação arredondada são aquelas com forma elíptica ou circular com o comprimento igual ou menor do que três vezes a largura;
- Quatro ou mais indicações arredondadas relevantes em uma linha separadas por 1,5 mm ou menos (borda a borda).

O código ASME IX especifica o ensaio de dobramento em pelo menos quatro corpos de prova afim de se identificar trincas no metal de solda e metal de base. Os resultados serão analisados de acordo ao item QW-161 do código sendo que a região da solda, bem como a ZTA devem estar dentro da área dobrada. O corpo de prova não deve apresentar trincas na região soldada e ZTA excedendo 3 mm medidos em qualquer direção em sua superfície convexa após o dobramento. Descontinuidades abertas nas extremidades da amostra só devem ser consideradas caso haja comprovação que resultaram devido à falta de fusão, inclusões de escória ou descontinuidades internas. Além disso, o *overlay* não deve apresentar descontinuidades maiores que 1,5 mm medidos em qualquer direção, assim como não pode haver também descontinuidades maiores que 3 mm ao longo da interface da superfície soldada. O código ainda especifica que os ensaios de dobramento podem ser divididos em dois para raiz e dois para face ou quatro laterais. Por se tratar de uma soldagem sem chanfro, foi optado neste estudo a realização de quatro dobramentos laterais.

O código também determina o ensaio de tração em pelo menos dois corpos de prova, conforme o item QW-153, sendo que os mesmos deverão suportar uma carga equivalente à sua tensão de ruptura. Entretanto, o presente estudo visa uma soldagem de revestimento e não de união, onde, desta forma, os ensaios de tração não são obrigatórios.

4.4 Revestimento Metálico Anticorrosivo por Soldagem

Combinações de metais dissimilares compreendem um ou mais metais de base e um ou mais metais de adição que formam a solda propriamente dita (KEJELIN, 2012). O código ASME IX agrupa os metais de base por meio da composição química, soldabilidade e propriedades mecânicas, dessa forma atribui uma denominação chamada de *P-Number*. O item QW-403.11 é o tópico responsável por detalhar os aspectos pertinentes à faixa de qualificação do *P-Number* (SILVA *et al*, 2019).

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

A soldagem dissimilar é bastante aplicada em revestimentos metálicos internos nos equipamentos de processo nas indústrias petroquímicas. Isso ocorre devido ao ambiente corrosivo somado ao fato que os materiais com propriedade desejáveis para estes ambientes possuem um custo extremamente alto. Assim, se torna mais indicado do ponto de vista econômico, construir estes equipamentos em aço carbono estrutural e aplicar um revestimento metálico com uma liga anticorrosiva como, por exemplo, o metal monel, garantindo assim as propriedades mecânicas e estruturais, bem como a resistência à corrosão. Para execução destes revestimentos anticorrosivos durante a construção dos equipamentos de processo, as técnicas mais tradicionais aplicadas na indústria são o arco submerso e o MIG.

O processo de soldagem por eletrodo revestido é indicado devido a sua boa aplicabilidade, alta taxa de deposição, baixo aporte térmico e aceitável qualidade final. O baixo aporte térmico é desejável, visto que se deve evitar alterações indesejáveis na estrutura metalúrgica, como por exemplo, liquação excessiva, precipitação de carbonetos, crescimento de grão na ZTA (zona termicamente afetada), dentre outros. Estes fenômenos podem provocar perda de resistência à corrosão e propagação de trincas e defeitos (WAINER *et al*, 2015). Tais cuidados também são essenciais no processo de soldagem TIG, pois, também pode ocorrer nucleação de trincas de contorno de grão durante a solidificação (GONZAGA *et al*, 2021).

4.5 Controle de Diluição

Na soldagem de revestimento anticorrosivo, que tem como premissa a utilização de metais dissimilares, a composição química da solda terá um valor intermediário entre as composições químicas do metal de base e do metal de adição. Contudo, caso ocorram alterações nos parâmetros de soldagem empregados, podem ocorrer também alterações na composição química da solda. Isso ocorre devido ao aporte térmico influenciar diretamente a fusão e deposição dos metais de base e adição.

Em função disso, é bastante relevante conhecer e estimar a composição química final da junta soldada dissimilar a qual implica no conhecimento da diluição imposta pelo procedimento de soldagem empregado. Por conceito, a diluição pode ser entendida como o percentual de metal que está contida no metal de solda, ou seja, a diluição pode ser definida como uma alteração na composição do metal de adição depositado por soldagem causada pela mistura com o metal de base (KEJELIN, 2012). A Figura 1 ilustra o método de determinação de diluição para ensaios de deposição simples.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

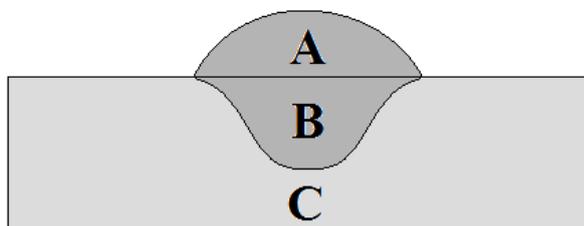


Figura 1: Apresentação esquemática da zona fundida/metal de solda (A+B) e de base (C). A região (A) compreende a parcela oriunda do metal de adição e a região (B) compreende a parcela de metal de base fundida. (Fonte: Kejelin, 2012)

4.6 RQPS e EPS

O chamado Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem é um documento normativo que agrupa todas as informações e dados necessários para a soldagem de uma peça teste (SILVA *et al*, 2019). Este documento reúne todos os valores reais das variáveis essenciais de soldagem, bem como das não-essenciais e suplementares quando for cabível. Somado a isso, todos os resultados dos ensaios e testes previstos no código devem ser registrados também no RQPS, sendo pré-requisito para a validação do mesmo desde que estejam dentro dos limites de referência.

A Especificação do Procedimento de Soldagem, por sua vez, é um documento originado a partir de um RQPS e tem como função registrar o procedimento de soldagem qualificado (SILVA *et al*, 2019). A EPS fornece todas as informações acerca do processo de soldagem a ser aplicado visando atender aos requisitos das normas de fabricação e das normas de qualificação de procedimento de soldagem.

Os modelos do RQPS e da EPS podem ser encontrados no código ASME IX nos itens QW-483 e QW-482, respectivamente.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

O metal de base (QW-403 – ASME IX) é um aço carbono ASTM A 283 Gr. C, comumente aplicado na indústria como substrato estrutural, classificado pelo código como *P-Number* 1. Foram fabricados dois corpos de prova de modo a atender às solicitações e critérios previstos no código ASME IX e de cada um foram retiradas tiras metálicas as quais precisaram ser submetidas ao processo de caracterização, bem como aos ensaios mecânicos. A Figura 2 representa o croqui dos corpos de prova utilizados neste estudo, sendo os dois em formato de chapa.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

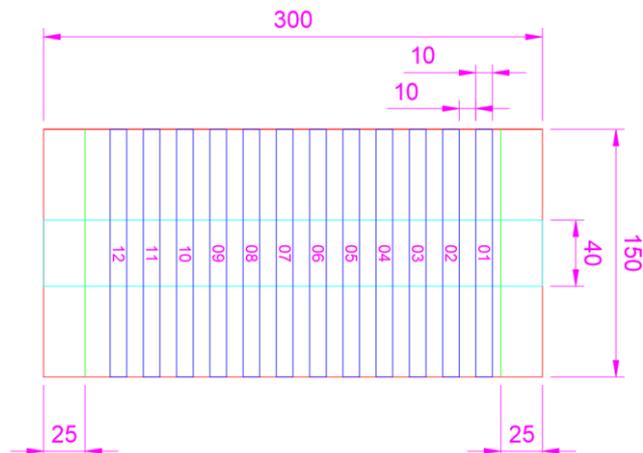


Figura 1: Croqui dos corpos de prova
(Fonte: própria)

Cada corpo de prova foi soldado aplicando-se diferentes números de passes e cordões, bem como diferentes parâmetros de soldagem e diâmetros de eletrodo. Foi adotado a estratégia de soldagem linear, em função do melhor controle do aporte térmico. As Figuras 3 e 4 ilustram respectivamente os croquis de soldagem dos corpos de prova.

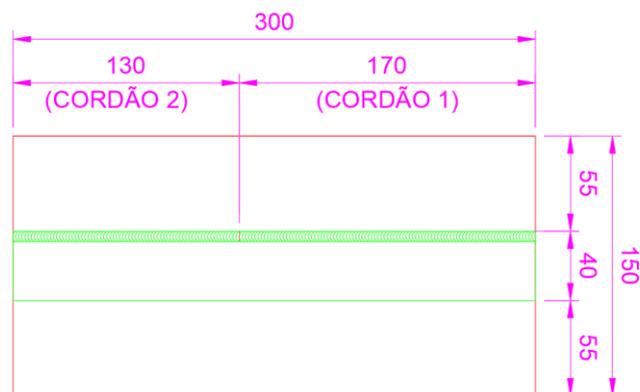


Figura 3: CP 01
(Fonte: própria)

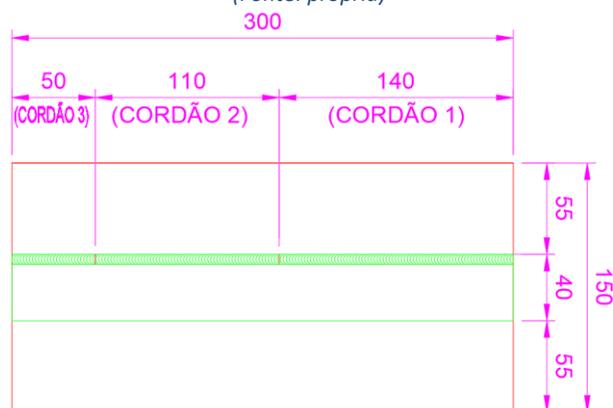


Figura 4: CP 02
(Fonte: própria)

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

O consumível de soldagem (QW-404 – ASME IX) utilizado foi um eletrodo a base da liga de monel SFA-5.11 de especificação AWS ENiCu 7. No CP 1 foi utilizado eletrodo com diâmetro de 3,25 mm e no CP 2 com diâmetro de 2,5 mm. O Quadro 1 sumariza a composição química dos materiais utilizados nesta pesquisa, conforme código ASME II.

*Quadro 1: Composição química do metal base e adição
(Fonte: ASME II – Part A)*

Material	C	Mn	Cr	Si	Mb	Ni	S	P	Ti	Fe	Cu
A 283 Gr. C	0,24%	0,90%	0,00%	0,40%	0,00%	0,00%	0,40%	0,35%	0,00%	97,51%	0,20%
NiCu7	0,15%	4,00%	0,00%	1,50%	0,00%	62,00%	0,02%	0,02%	1,00%	2,50%	28,81%

5.2 Parâmetros de Soldagem

Para uma soldagem de revestimento anticorrosivo, o controle do aporte térmico é essencial, visto que se torna indesejável altas taxas de diluição do metal de solda de modo que a proteção anticorrosiva pode ser comprometida. Os parâmetros de soldagem foram definidos usando os valores de referência que são comumente utilizados nas EPS já existentes aplicadas à soldagem de revestimento em equipamentos diversos.

5.3 Ensaios Não-Destrutivos (END) e Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaio visual (EVS) e ensaio de líquido penetrante (LP) em ambos os corpos. Os consumíveis usados no ensaio de LP foi o penetrante VP 30 (propelente hidrocarboneto), tipo – visíveis, lavável a água e o revelador foi o VP 60 (propelente hidrocarboneto) úmido não aquoso, ambos atendem a norma AMS 2644 (Inspection Material, Penetrant) e são da marca Metal Check.

Os ensaios de dobramento lateral foram realizados no laboratório JC e atenderam a metodologia do ASME IX. A máquina utilizada foi uma Tinius Olsen com um cutelo com diâmetro de 38 mm. A distância entre os roletes foi de 60,4 mm e o ângulo foi de 180°. Foi utilizado um paquímetro para a aferição dos corpos de prova e os ensaios foram realizados a temperatura ambiente.

Todos os equipamentos e instrumentos de medição utilizados nos ensaios estavam devidamente calibrados e com certificado dentro do prazo de validade.

5.4 Caracterização Macro e Microestrutural

A macrografia da secção transversal das amostras tem o intuito de se observar a união soldada, a área de interface e sua diluição, bem como identificar visualmente

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM**

alguma indicação relevante. Os ensaios de macrografia foram realizados no laboratório JC e atenderam a metodologia do ASME IX, com ataque químico aplicando água régia e iodo a 10%. Para a visualização foi utilizado um microscópio estereoscópico binocular com ampliação de até 10 vezes.

Uma análise química também se faz necessária visto que o objetivo é garantir uma camada de material anticorrosivo, neste caso o monel, a qual precisa estar com baixo percentual de ferro em sua estrutura. Algumas empresas do ramo químico/petroquímico, utilizam como procedimento neste tipo de soldagem, uma tolerância máxima de ferro na composição de 5% na superfície do metal de solda. Desta forma, é desejável que a composição química do metal de solda se mantenha o mais homogêneo e preservada possível. A análise química foi realizada no laboratório JC, onde a amostra foi retirada a 0,8 mm da parte superior e a $\pm 3,0$ mm da interface conforme preconizado no código ASME IX QW-462.5(a). A Figura 5 ilustra o croqui de retirada da amostra para análise química, conforme ASME IX.

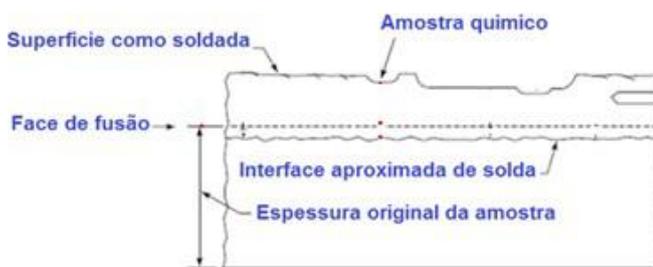


Figura 5: Croqui da amostra para análise química
(Fonte: JC Laboratórios LTDA)

A metodologia aplicada para a realização deste ensaio foi baseada nas normas ASTM E30, E350 e E351 (via úmida e combustão).

A técnica de microscopia óptica foi realizada com o intuito de entender a microestrutura formada no metal de solda, sua interface com o metal de base bem como identificar eventuais precipitações de elementos e/ou fases deletérias, além de auxiliar na caracterização dos efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura resultante em especial na interface da linha de fusão, no sentido de se observar a ocorrência e a extensão das chamadas zonas parcialmente fundidas. O equipamento utilizado foi um microscópio óptico Scop A1 Zeiss.

Apesar do intuito desta soldagem ser o aumento da proteção anticorrosiva e não o aumento de dureza, também foi realizado um ensaio de microdureza Vickers nos corpos de prova ainda em complemento à caracterização microestrutural destas soldas permitindo assim observar o gradiente desta propriedade ao longo da peça soldada, partindo do metal de solda até o metal de base, passando então pela zona de interface. É

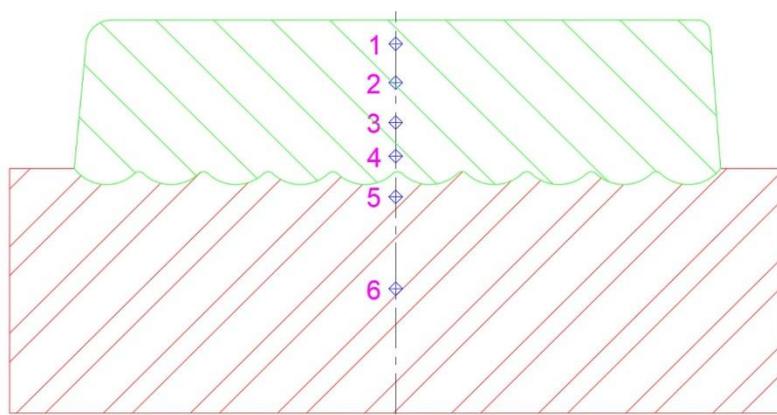
CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

importante o conhecimento do perfil de dureza obtido, uma vez que a formação de fases muito duras pode provocar alguns mecanismos de danos e a nucleação de trincas no material. A microdureza foi realizada tomando como base uma linha imaginária no centro dos corpos de prova, onde foram definidos seis pontos de análise, conforme o Quadro 2 e a Figura 6 abaixo:

*Quadro 2: Determinação dos pontos de análise do ensaio de microdureza Vickers
(Fonte:Própria)*

Pontos de Amostra	CP01	CP02
01	Solda	Solda
02	Solda	Solda
03	Solda	Solda
04	Interface	Interface
05	Interface	Interface
06	Base	Base



*Figura 6: Croqui dos pontos para o ensaio de microdureza Vickers
(Fonte: própria)*

O equipamento utilizado foi um durômetro Shimadzu HMV.

6 RESULTADOS

6.1 Parâmetros de Soldagem

Para cada corpo de prova foi utilizado um eletrodo com diâmetro diferente e por consequência, parâmetros de soldagem diferentes. O Quadro 3 ilustra os parâmetros de soldagem aplicados nos corpos de prova.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

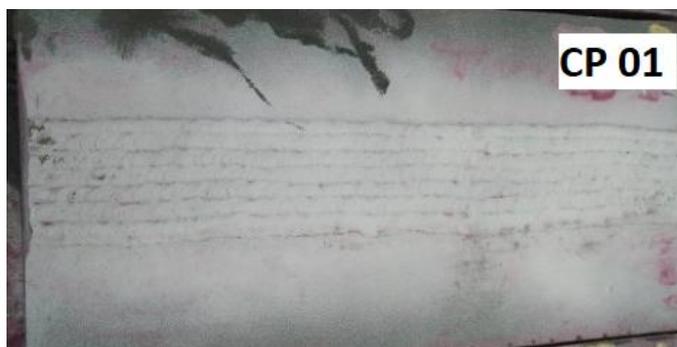
Quadro 3: Parâmetros de soldagem
(Fonte: própria)

CORPO DE PROVA 01								
CORDÃO	ELETRODO	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	TEMPO (s)	COMPRIMENTO (mm)	VELOCIDADE (mm/s)	HEAT INPUT (J/mm)
1	80 M NiCu 7	3,25	43	92	56	170	3,04	1.303
2		3,25	42	92	44	130	2,95	1.308
CORPO DE PROVA 02								
CORDÃO	ELETRODO	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	TEMPO (s)	COMPRIMENTO (mm)	VELOCIDADE (mm/s)	HEAT INPUT (J/mm)
1	80 M NiCu 7	2,5	43	75	64	140	2,27	1.423
2		2,5	44	77	50	110	2,30	1.473
3		2,5	44	78	47	50	1,06	3.226

A soldagem por eletrodo revestido foi executada na posição plana para ambos os corpos de prova e o soldador é devidamente qualificado. Visando a validação do aporte térmico e a avaliação da qualidade do processo de soldagem, foram acompanhados e registados todos os parâmetros dos cordões ao longo de toda a extensão linear da chapa. Os passes seguintes mantiveram os parâmetros tabelados acima. O Heat Input aplicado é teórico, visto que não foi considerado coeficiente de rendimento da máquina.

6.2 Ensaios Não-Destrutivos (END)

Os dois corpos de prova foram submetidos a uma inspeção visual e posterior ensaio de líquido penetrante. As Figuras 7 (a) e (b), superior e inferior, ilustram a execução do ensaio de LP nos corpos de prova 1 e 2 respectivamente.



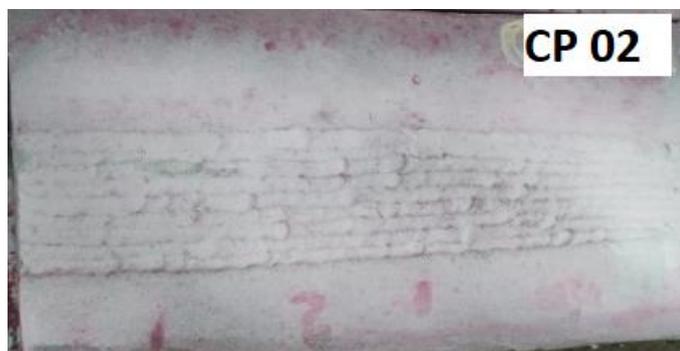
CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

Figura 7: (a) Ensaio de LP no CP 01. (b) Ensaio de LP no CP 02.
(Fonte: própria)

Nenhuma indicação relevante de descontinuidades e/ou defeitos foram detectados nestes ensaios. Isso é um indício que tanto os parâmetros quanto a execução da soldagem foram bem definidos e executados. Os ensaios foram acompanhados por um inspetor de END qualificado.

6.3 Macrografia

As Figuras 8 (a) e (b), superior e inferior, ilustram as macrografias dos corpos de prova 1 e 2 respectivamente.



Figura 8: (a) Macrografia no CP 01. (b) Macrografia no CP 02.
(Fonte: própria)

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

Nas macrografias não foram identificados a presença de descontinuidades, nem indicação de segregação do metal de solda em relação ao substrato, portanto, o ensaio apresentou resultados satisfatórios. É o possível perceber também toda a região da zona fundida, indicando visualmente que não houve alto volume de diluição.

6.4 Dobramento

O Quadro 4 evidencia as cotas dos corpos de prova e os resultados de cada dobramento.

*Quadro 4: Resultados dos ensaios de dobramento
(Fonte: própria)*

CP #	Sequência	Espessura (mm)	Largura (mm)	Posição	Resultados	Laudo
1	DL-1	10,0	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado
1	DL-2	10,0	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado
1	DL-3	10,2	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado
1	DL-4	10,2	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado
2	DL-1	10,0	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado
2	DL-2	10,0	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado
2	DL-3	10,2	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado
2	DL-4	10,2	18,0	Lateral	Isento de Descontinuidades	Aprovado

Cada corpo de prova sofreu quatro ensaios de dobramento, onde todos foram laterais. Todos os corpos de prova se deformaram de modo a caracterizar um material dúctil, onde nenhuma trinca ou defeito foi identificado.

6.5 Análise Química

O Quadro 5 apresenta a composição química percentual dos corpos de prova.

*Quadro 5: Composição química dos corpos de prova
(Fonte: própria)*

CP	C	Mn	Cr	Si	Mb	Ni	S	P	Ti	Fe	Cu
#1	0,02%	3,40%	0,00%	0,48%	0,00%	63,78%	0,01%	0,01%	1,57%	0,80%	29,93%
#2	0,01%	3,51%	0,00%	0,46%	0,00%	63,88%	0,01%	0,01%	1,58%	0,70%	29,84%

A análise química mostrou teores de elementos químicos praticamente idênticos para os dois corpos de prova. Somando os teores de níquel-cobre, temos quase a totalidade da composição do material caracterizando assim a preservação do monel e por consequência, a propriedade anticorrosiva. Outro indicativo importante é o baixo teor de ferro e carbono no metal de adição, indicando que houve uma baixa difusão destes elementos no metal de adição.

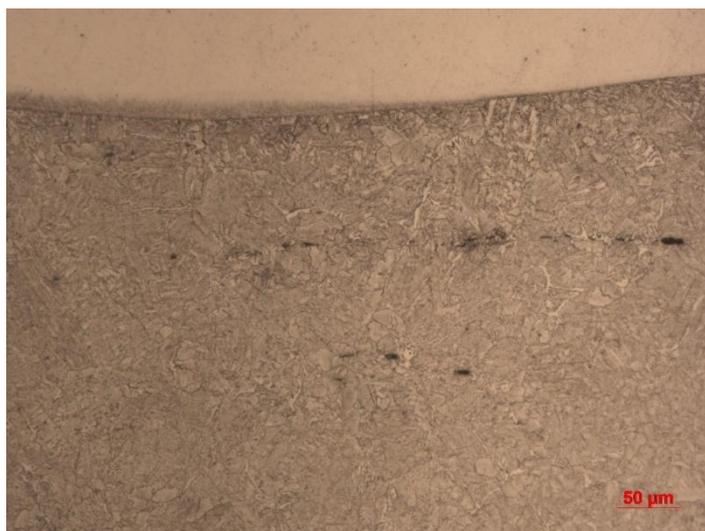
CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM****6.6 Microscopia óptica**

Os ensaios metalográficos através da microscopia óptica foram realizados afim de se tentar associar os parâmetros de soldagem aplicados com a micrografia apresentada. A Identificação de eventuais formações de fases deletérias e das chamadas zonas parcialmente diluídas (ZPD) é bastante relevante durante a avaliação da metalurgia da soldagem.

A seguir tem-se as imagens obtidas através da microscopia óptica separada por corpo de prova.

CP 01:

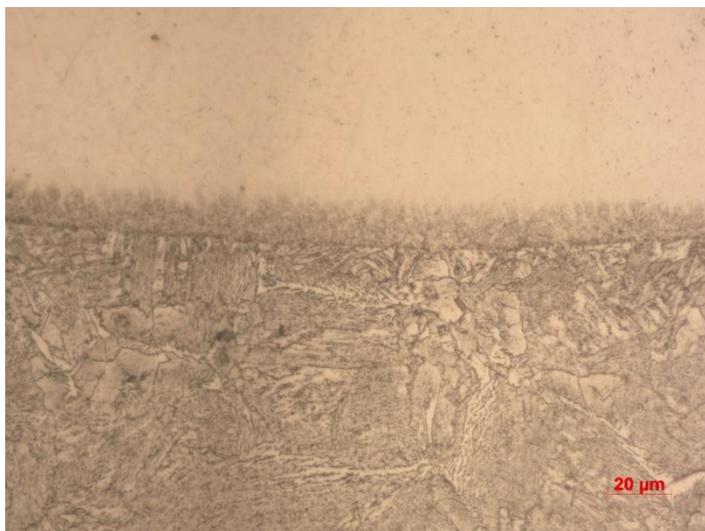
A Figura 9 ilustra a zona de interface do metal de base (MB) com o metal de solda (MS):



*Figura 9: Zona de interface com ampliação 200x – CP 01
(Fonte: Laboratório SENAI CIMATEC)*

É possível observar na microestrutura a presença de ferrita e perlita, formações características de um aço carbono ou aço baixa liga. Também é possível perceber a linha de interface com o metal de solda. A Figura 10 mostra de maneira mais ampliada a interface do metal de base (MB) com o metal de solda (MS):

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM



*Figura 10: Zona de interface com ampliação 500x – CP 01
(Fonte: Laboratório SENAI CIMATEC)*

Se observa com mais clareza na imagem acima que próximo à linha de fusão os grãos apresentam tamanhos maiores, característica do fenômeno de recozimento. Um ponto que chamou a atenção é a presença das chamadas ferritas de Widmanstätten, a qual pode ser entendida como uma fase deletéria (Kejelin, 2012).

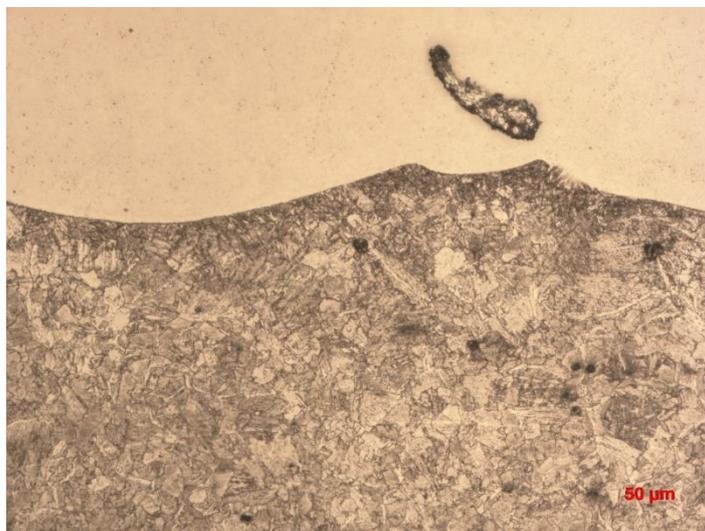
A Figura 11 detalha mais o metal de base, onde se percebe um número considerável de ferritas de Widmanstätten.



*Figura 11: Zona de MB com ampliação 500x - CP 01
(Fonte: Laboratório SENAI CIMATEC)*

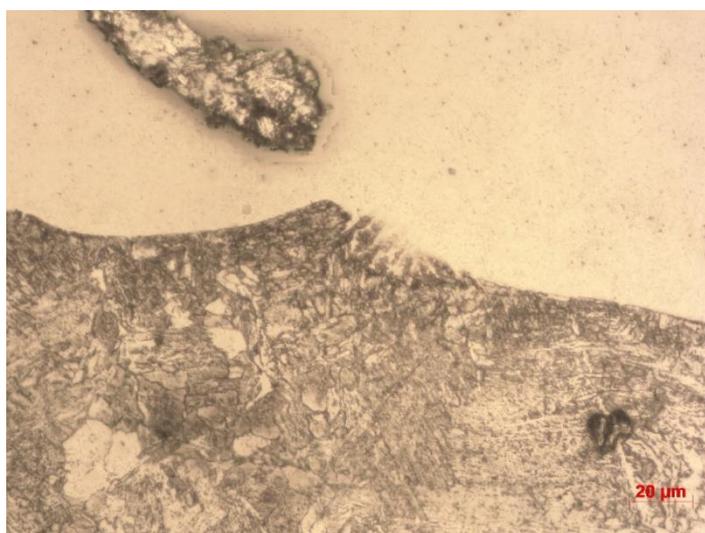
CP 02:

A Figura 12 ilustra a zona de interface do metal de base (MB) com o metal de solda (MS):

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

*Figura 12: Zona de interface com ampliação 200x - CP 02
(Fonte: Laboratório SENAI CIMATEC)*

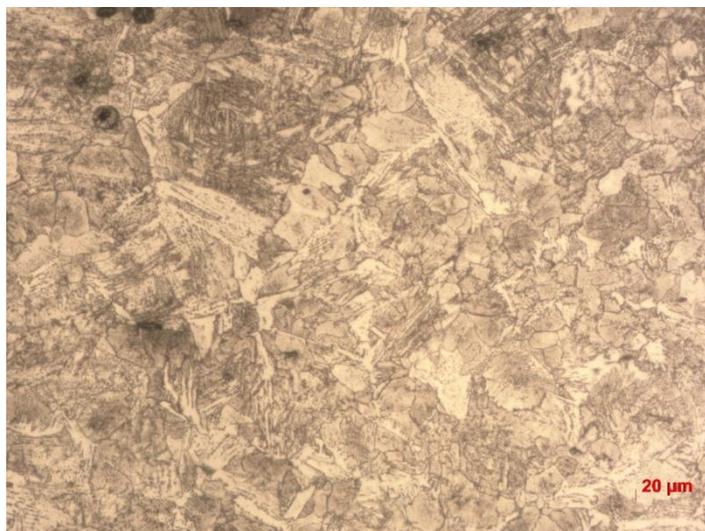
Se observa nesta imagem a presença de uma zona parcialmente diluída (ZPD), formando uma “ilha” no interior do metal de solda. A Figura 13 abaixo amplia esta região.



*Figura 13: Zona de interface com ampliação 500x – CP 02
(Fonte: Laboratório SENAI CIMATEC)*

A Figura 14, focada no metal de base, indica a formação de grãos com uma grande variedade e diversidade na geometria e tamanho, porém, se percebe uma microestrutura ferrítica e perlítica além da presença das ferritas de Widmanstätten.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM



*Figura 14: Zona de MB com ampliação 500x – CP 02
(Fonte: Laboratório SENAI CIMATEC)*

A formação das zonas parcialmente diluídas sob a linha de fusão ocorreu em pontos específicos e de forma relativamente discreta. Isso é uma característica de soldagens com baixos níveis de diluição. Estas ZPD's, podem ser melhor analisadas e caracterizadas através de ensaios com uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e com o ensaio de EDS. Como o foco deste trabalho não foi a análise metalúrgica, porém, não foram realizados estes ensaios.

6.7 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza realizado nos dois corpos de prova tomou como princípio a identificação de eventuais formações de fases muito duras, o que poderia vir a ser um potencial causador de trincas/descontinuidades. Em ambos os corpos de prova não foram detectados a formação de fases muito duras, ficando o maior ponto com uma dureza medida de 251 HV. A Figura 15 indica o gráfico de microdureza para os dois corpos de prova.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

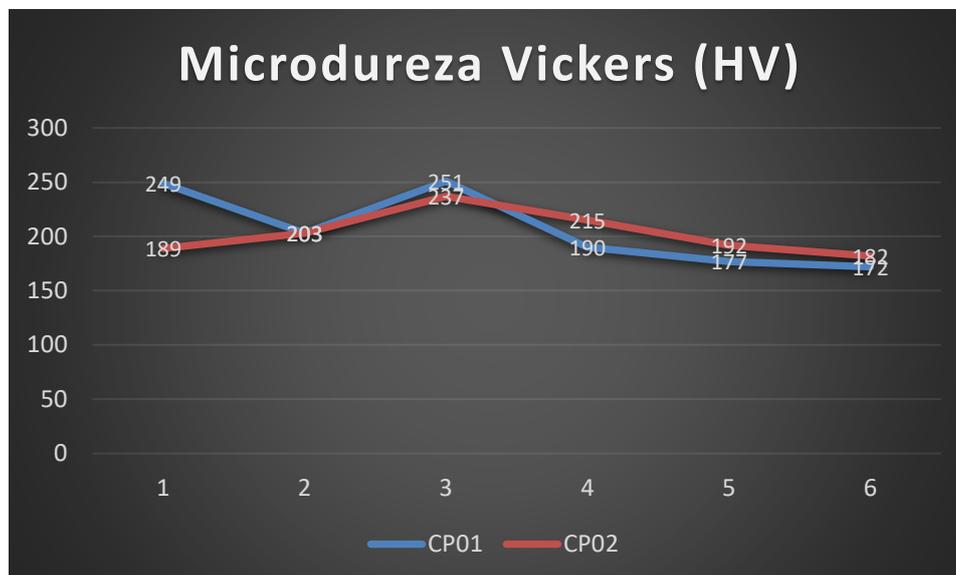


Figura 15: Resultado do ensaio de microdureza Vickers
(Fonte: Laboratório SENAI CIMATEC)

Importante observar que ambos os corpos de prova apresentaram uma maior dureza no ponto 3, o qual, conforme metodologia aplicada, corresponde ao centro do metal de solda. Em linhas gerais, os valores médios de dureza dos dois corpos de prova estão muito próximos, indicando uma consistência dos parâmetros de soldagem aplicados.

O aço ASTM A 283 Gr. C não possui requisito normativo referente à dureza, ficando a cargo então do requisito especificado no procedimento o qual não se aplica a este estudo.

7 CONCLUSÕES

É um desafio cada vez maior para as indústrias químicas e petroquímicas o controle e mitigação do fenômeno da corrosão. Desde a concepção em projeto até os níveis de inspeção e manutenção continuam buscando alternativas que sejam viáveis do ponto de vista técnico, da segurança, bem como financeiro. A soldagem de revestimento e as técnicas de *cladding* estão cada vez mais sendo aplicadas, demandando assim um conhecimento da literatura que compreende estes processos.

O presente estudo buscou compreender e avaliar a possibilidade da elaboração de um procedimento de soldagem qualificado, aplicando o metal monel como revestimento anticorrosivo em substrato de aço carbono, visando uma soldagem de reparo através da técnica de eletrodo revestido. Para execução da solda de revestimento anticorrosivo, os processos mais tradicionais aplicados na indústria são o arco submerso e o MIG. Isso se dá devido a estes tipos de soldagem serem amplamente utilizados em construção e montagem. Como o foco deste trabalho foi especificar um procedimento de reparo em

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

campo, foi optado o processo eletrodo revestido o qual é amplamente utilizado nos cenários de manutenção e reparos. Além disso, é um processo muito versátil e com uma maior gama de recursos, tais como, soldadores qualificados e consumíveis disponíveis.

Os ensaios não destrutivos não detectaram nenhuma descontinuidade ou indicação relevante. Os dobramentos também foram aprovados com sucesso, de modo que nenhuma trinca ou falha no revestimento soldado foi verificado. Desta forma conclui-se que os ensaios preconizados no código ASME IX foram aprovados.

Do ponto de vista metalúrgico, apesar de não ter sido o foco principal deste trabalho, pôde-se concluir através da análise química que o monel foi preservado no metal de solda, indicando assim que a taxa de diluição foi baixa o que é extremamente requerido neste caso. O ensaio de microdureza Vickers também trouxe resultados satisfatórios, onde foi observado um perfil de dureza uniforme, bem como a ausência de fases muito duras, como a martensita.

Os resultados acima foram válidos para os dois corpos de prova, mesmo com número de passes e diâmetros de eletrodo diferentes. Desta forma, face aos resultados apresentados, conclui-se que é possível a elaboração de um RQPS e posterior EPS para este tipo de soldagem.

Como sugestão para trabalhos futuros fica o aprofundamento dos estudos e ensaios de natureza metalúrgica com uma investigação das chamadas zonas parcialmente diluídas com a utilização de ensaios através de MEV e também da técnica de medição da composição química por EDS, a qual é semiquantitativa e amplamente utilizada em estudos de metalurgia da soldagem para verificar a composição química de regiões (microestruturas) de pequenas dimensões as quais não são possíveis de serem medidas através de métodos convencionais de análise química. Avaliar também se ocorre alguma alteração nos resultados se optando por passes de soldagem circunferenciais ao invés dos lineares.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CIMATEC**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM****REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME section IX: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators.** New York: ASME; 2021.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **PIPING, Process. ASME B31.3.** New York, NY, USA, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME section II: Materials.** New York: ASME; 2021.

DA SILVA TELLES, Pedro Carlos. **Materiais para equipamentos de processo.** Interciencia, 2003.

DA SILVA, Marcos Mesquita et al. **Estudo de revestimentos de liga de níquel aplicados por soldagem em aço API 5L Gr B.** Revista Principia, 2018.

GONZAGA, Rodrigo Stohler; FARIAS, Francisco Werley Cipriano; DA CRUZ PAYÃO FILHO, João. **Microstructural characterization of the transition zone between a C-Mn steel pipe and a 70% Ni30% Cu alloy cladding welded by HW-GTAW.** International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 192, p. 104433, 2021.

KEJELIN, Norton Zanette. **Soldagem de Revestimento de Aços Comuns C-Mn com Superliga a Base de Níquel Inconel 625.** 2012.

KOU, Sindo. **Welding metallurgy.** New Jersey, USA, p. 431-446, 2003.

MOTA, Carlos Alberto Mendes da et al. **Revestimento de níquel depositado pela soldagem MIG e MIG com arame frio.** Soldagem & Inspeção, v. 21, p. 483-496, 2017.

SILVA, Ana Carla S. et al. **Aplicação da Metodologia para Qualificação de Procedimentos de Soldagem de Tubulações Industriais Conforme Parâmetros dos Códigos ASME B31. 3 e ASME SECTION IX.** Soldagem & Inspeção, v. 24, 2019.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia.** Editora Blucher, ed. 10, 2015.

WANG Zhihui. **Comparison of welder performance qualification rules between Chinese regulation and ASME BPVS Sec. IX-2015.** In: American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of the ASME 2016: Pressure Vessels and Piping Conference.