

REVESTIMENTO DE INCONEL EM TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX COMO REPARO PARA PERFURAÇÕES POR CORROSÃO LOCALIZADA

Gabriela Vilhena Marchesi, gmarchesi02@gmail.com¹

Lucas Dias Schuller, shullerlucas@yahoo.com.br¹

Marcelo Camargo Severo de Macêdo, mcamargo0207@gmail.com¹

Marcos Lessa Kugizaki, marcoslk@gmail.com¹

Temístocles de Sousa Luz, temistocles.luz@icloud.com¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, 29075-073.

Resumo: Os Aços Inoxidáveis Superduplex conciliam ótima resistência mecânica e alta resistência à corrosão atendendo aplicações adversas, porém podem apresentar problemas de corrosão que provocam perfurações em aplicações tubulares para condução de água do mar, necessitando de reparos. Comumente em plataformas de extração de petróleo, o reparo dessas regiões é feito com o isolamento por meio de uma bandagem de compósito polimérico, para posterior substituição. Este trabalho traz uma alternativa de reparo permanente, que é a aplicação de uma camada de Inconel pelo método de Cladding na região afetada. Para viabilizar esse procedimento é necessário que o aporte térmico do processo não atinja as temperaturas e os tempos necessários para a formação de precipitados e, portanto, reduzir a resistência à corrosão. Para isso foi utilizado baixa energia de soldagem, monitoramento da temperatura interna do tubo durante a soldagem e análise metalográfica. Os resultados mostraram que é viável utilizar o revestimento de Inconel, uma vez que não houve condições para a formação dos precipitados e nem alterações significantes na microestrutura.

Palavras-chave: corrosão, superduplex, inconel, cladding, gmaw.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex (AID), ao longo dos últimos anos, tiveram seu uso aumentado nos diversos sistemas produtivos, principalmente no setor de energia. Esse crescimento está ligado às suas características, pois combinam uma elevada resistência mecânica e tenacidade com a resistência à corrosão, quando comparados com os demais aços inoxidáveis.

No setor de petróleo e gás, o ambiente de processamento desses produtos envolve: água do mar, altos teores de CO₂, H₂S, entre outros. Dessa forma, faz-se necessário a busca por materiais mais adaptados a tais ambientes. Nesse sentido, o uso do aço inoxidável superduplex (AISD) se destaca em função de seu Pitting Resistance Equivalent Number (PREN) se apresentar superior ao dos aços inoxidáveis duplex. Vários trabalhos (Cleland, 1996; Gunn, 2003 e ISO15156:2015) mostram que o PREN para os AISD atinge valores superiores a 40, enquanto para os aços inoxidáveis duplex convencionais, esses valores estariam na ordem de 30, de antemão a superioridade destas ligas é evidenciada.

Especificamente na exploração de petróleo, o AISD é utilizado nas tubulações para condução de água marítima, mas apesar de sua elevada resistência à corrosão, é possível encontrar casos em que a mesma ocorreu, o que resulta em perfurações nos dutos e consequentes vazamentos. Em sua grande maioria, devido as características do balanço de fases, as regiões submetidas ao aquecimento severo, como as próximas a zona fundida no processo de soldagem, estarão sujeitas a ação destes fenômenos corrosivos. Segundo Garfias-Mesias et al. (1996) existe uma relação direta entre a resistência à corrosão e o teor de ferrita presente nas ligas superduplex.

Gunn (2003) ressalta que as melhores características estão associadas ao balanço microestrutural (volume de ferrita igual ao volume de austenita) e a ausência de fases deletérias (fases intermetálicas σ , χ e R, nitretos de CrN e Cr₂N, e os carbonetos Cr₂₃C₆ e Cr₇C₃). Alcançar a proporção de 1:1 de austenita e ferrita é um grande desafio na soldagem dos AID e AISD.

O controle da energia de soldagem aportada é essencial para conseguir a microestrutura desejada. Na situação em que o aporte térmico é baixo, a porcentagem de ferrita se torna muito elevada na microestrutura, enquanto o aporte elevado

leva a um grande volume de fases deletérias. Pardal *et al.* (2008) recomendam que para o caso de soldagem de AISD o aporte de calor deve estar entre 0,2 kJ/mm e 1,5 kJ/mm.

O intuito do presente trabalho é apresentar uma nova metodologia de reparo das regiões perfuradas por corrosão, em alternativa ao método utilizado atualmente na indústria offshore. O restauro da região dar-se-á pelo depósito de material de alta resistência utilizando a técnica Cladding mediante processo de soldagem Gas Metal Arc Welding (GMAW).

O estabelecimento do depósito está pautado na manutenção das características de resistência à corrosão da região de interface do metal de base e depósito, mantendo como referência o balanço de fases, ponto referencial para as características dos aços inoxidáveis duplex e superduplex. Além de garantir que a energia térmica aportada no processo não favoreça o surgimento de precipitados respeitando a cinética de formação desses, como demonstra o diagrama da Figura 1.

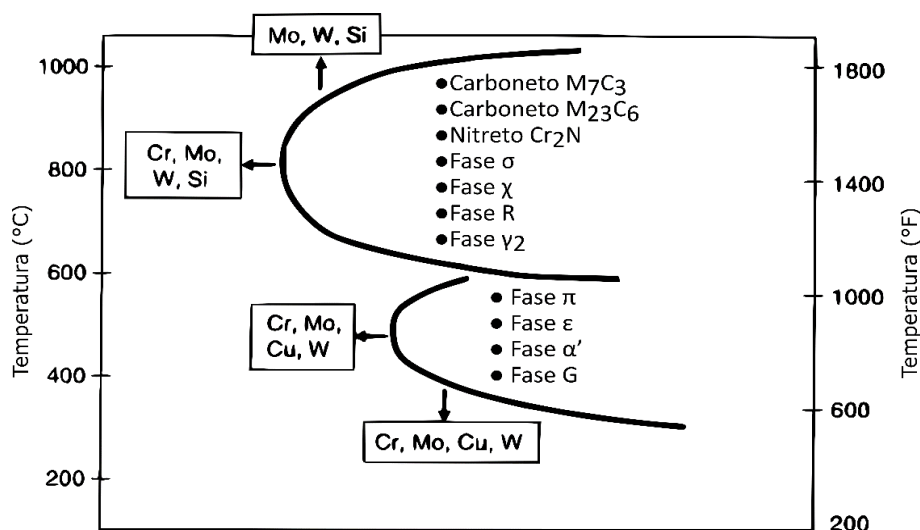


Figura 1. Diagrama de formação dos precipitados nos AID, adaptado de Lippold e Kotecki (2005).

1.1. Método de reparo convencional

As perfurações por corrosão (Figura 2) podem causar sérios transtornos, como a parada da linha ou provocar acidentes maiores, fazendo-se necessário uma manutenção célere.



Figura 2. Perfuração provocada por corrosão na solda de emenda de tubo em AISD.

No reparo em campo, o procedimento convencional consiste no isolamento do vazamento por meio de uma bandagem polimérica em serviço e posteriormente, durante a parada da planta, na substituição do trecho danificado. O procedimento de vedação no campo normalmente consiste no estancamento primário por meio de uma vedação mecânica por cinta metálica, a qual pressiona um dispositivo de borracha ou polímero moldável, seguido de um isolamento do conjunto por

uma camada de compósito polimérico. Esse recobrimento sobre o tubo é uma solução temporária, pois, além da utilização desse material ser impróprio em plataformas, o processo de corrosão não é controlado. Logo, se faz necessário uma posterior troca de todo o trecho, como observado na Figura 3, durante uma parada do sistema de condução de água.



Figura 3. Trecho defeituoso com a bandagem de compósito polimérico.

1.2. Método de reparo por depósito de material de alta resistência

Uma nova proposta de reparo é apresentada neste trabalho como solução permanente que consiste em isolar o ponto de corrosão com uma camada de Inconel utilizando a técnica de Cladding na região afetada, como mostra a Figura 4.

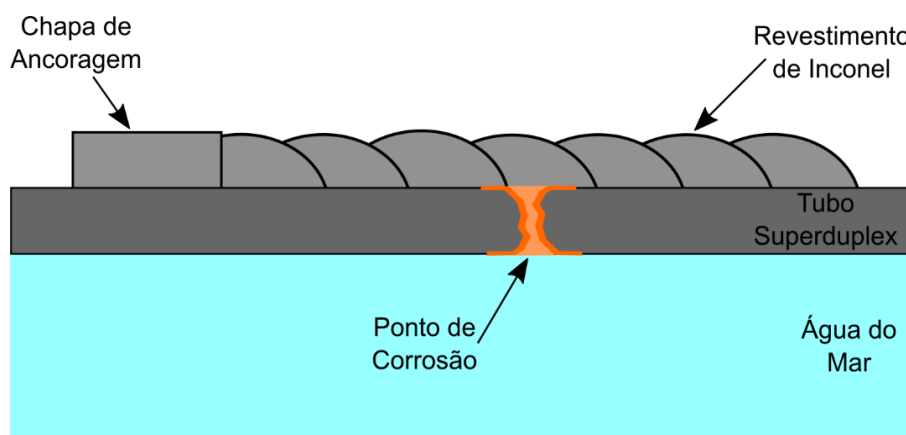


Figura 4. Esquema do revestimento de Inconel.

O Inconel apresenta excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão, superiores ao AISI como visto na Tabela 1, bloqueando nesse caso a propagação da corrosão na região, além disso a ASME PCC-2 (2015) indica que para reparos de tubulações por revestimento de material de alta resistência à corrosão, a tensão última do material do revestimento deve ser igual ou exceder a tensão última do metal de base.

Tabela 1. Propriedades dos materiais em análise.

Propriedades	Inconel 625	UNS S32760
Tensão última (MPa)	770	750
PREN	51,2	42,5

Tavares et. al. (2018) concluíram que o calor do aporte térmico da soldagem durante o processo de deposição do Inconel pode provocar a formação de precipitados e fases deletérias que irão degradar ainda mais as propriedades da região do metal de base inicialmente sensível. Levando em consideração a condição apresentada pela Figura 4, uma vez estabelecido o reparo, caso a região sob o depósito sofresse algum processo de precipitação de fase deletéria, o processo de degradação poderia se propagar pela interface entre o substrato e o depósito. Assim, para viabilizar o processo é necessário que a exposição da região interna do tubo fique em temperaturas e tempos que respeitem a cinética de formação dos precipitados. Isso permite que a degradação do material se limite a barreira estabelecida pelo “cladding”. Uma vez que não ultrapasse esses limites, o reparo com o revestimento de Inconel pode ser aplicado pela técnica de Cladding.

O processo de reparo com revestimento de Inconel, além de se estabelecer de forma definitiva, apresenta as vantagens da não parada de linha de produção, da reutilização do trecho defeituoso e da não geração dos resíduos para a confecção da bandagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Para avaliação do processo foi preparado um tubo, conforme mostra a Figura 5, de AISD UNS S32760 com 550 mm de comprimento, 170 mm de diâmetro e 3,8 mm de parede. A deposição do revestimento por meio de soldagem foi realizada em duas condições, uma com o tubo vazio e outra preenchido com água à 24 °C, que ficou em regime estacionário até o final do experimento. O estabelecimento do sistema estacionário buscou manter uma condição extrema de um duto onde, não há fluxo, embora exista fluido internamente, minimizando as taxas de dissipação térmica durante o processo de soldagem. Ambos experimentos foram realizados na posição 5G, buscando reproduzir as condições de campo. O revestimento foi executado por braço robótico Panasonic modelo TM-1400WGIII com processo a Gas Metal Arc Welding (GMAW) em multipasses. Foi empregue o arame sólido Inconel 625 de especificação AWS A5.14 com 1,2 mm de diâmetro.



Figura 5. Tubo em AISD UNS S32760 e robô de soldagem Panasonic.

Para atender as necessidades dos limites térmicos, foram realizados testes exploratórios até atingir um limite mínimo de energia de soldagem em que fosse capaz de realizar o processo. A soldagem foi executada com corrente pulsada em polaridade direta, como gás de proteção utilizou-se mistura de 70% Argônio e 30% Hélio, corrente média de 60 A, tensão média em 22,5 V e velocidade de soldagem a 20 cm/min e aporte térmico de 0,4 kJ/mm. Entre os passes respeitou-se a recomendação prática de temperatura inferior a 100 °C.

O processo foi monitorado por um sistema de aquisição de sinais elétricos e térmicos, permitindo que todas as soldas pudessem ser supervisionadas, não só para se observar a energia imposta durante o revestimento, mas a temperatura na região interna do tubo soldado. Para tanto foram utilizados um sistema com sensor tipo hall que permite o monitoramento de correntes na ordem de ± 500 A bem como uma placa de aquisição de tensão adequada a níveis de sinais da ordem de ± 100 V, ambos com frequências de aquisição de 5 kHz e 12 Bits. Foram utilizados ainda três termopares tipo K, o que favoreceu a observação dinâmica da temperatura em pontos distintos da zona de deposição como mostra a Figura 6. O termopar “1” ficou localizado exatamente na linha de direção da solda, enquanto os termopares “2” e “3” ficaram a 4 e 8 mm respectivamente da linha de direção da solda.

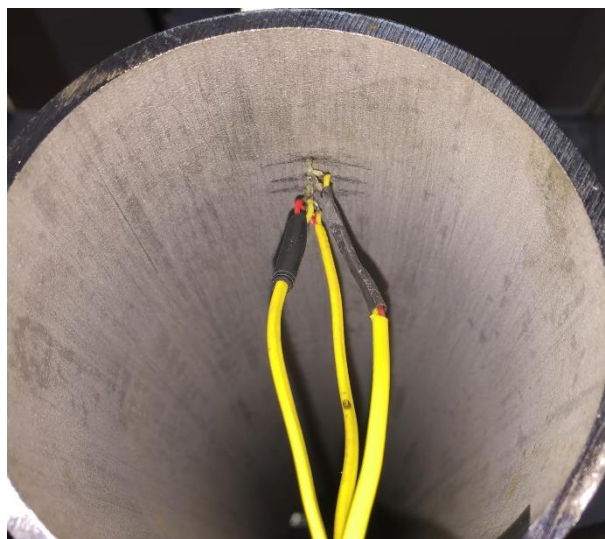


Figura 6. Fixação dos termopares na região interna do tubo.

Com o intuito de avaliar o efeito da dissipação térmica, posicionou-se uma chapa de ancoragem de AISD UNS S32760, no início do processo, a qual teve a função de cordão de ancoragem e sistema de dissipação térmica, minimizando o calor direcionado ao substrato. Foi utilizado uma chapa de ancoragem de dimensão (espessura) similar ao tubo utilizado (3,8 mm de parede).

Após o processo de revestimento, o mesmo foi seccionado para que fosse avaliada a característica da interface do depósito (região entre o depósito de Inconel e o aço inoxidável superduplex). Com o intuito de determinar o balanço de fases (ferrita e austenita), foram obtidas micrografias óticas. As amostras retiradas foram submetidas ao processo de metalografia, utilizando o reagente Behara (20 mL ácido clorídrico, 80 mL de água destilada e 1 g de metabissulfito de potássio) por trinta minutos para o ataque químico e revelação da microestrutura. As micrografias foram binarizadas no software IMAGE J para quantificar as fases, por meio de um tratamento monocromático da micrografia e posterior contagem dos pixels.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento executado, tomando como referência as dimensões da tubulação, se mostrou adequado ao processo de mitigação de algum dano de perfuração do duto. A Figura 7 retrata o depósito realizado sem que houvesse a inserção de água no interior do tubo. Nota-se a incidência de 15 passes consecutivos, gerando um setor de aproximadamente 150 mm por 80 mm. Ainda é observada a chapa de ancoragem, a qual teve o papel fundamental na minimização do aporte de calor inicial (primeiro cordão), onde gera uma distribuição de aproximadamente 50% do calor transferido, minimizando o efeito sobre o metal de base. As duas condições de avaliação apresentaram morfologia similar.

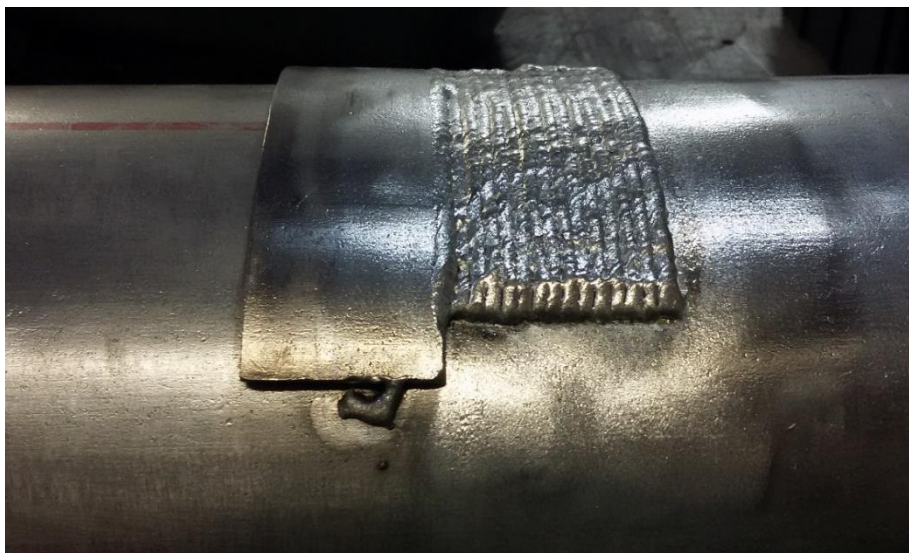


Figura 7. Aspecto do revestimento de Inconel 625 depositado em Tubo de AISD UNS S32760.

O uso de um processo secundário de arrefecimento como o caso da chapa de ancoragem já se mostrou bastante eficiente, proporcionando o depósito com o processo MIG sem que houvesse a incidência de perfuração, levando-se em consideração a espessura da parede do tubo em questão. Quando se avalia a temperatura na parede interna do tubo, verifica-se que os níveis de temperatura na soldagem do tubo sem água no interior, proporcionou picos de temperaturas na ordem de 730 °C, para o termopar “1” que indica a pior posição, onde recebe diretamente o calor aportado no processo. Se tomarmos como referência o nível de temperatura em que a literatura cita a formação de fases deletérias e mesmo o desbalanço das fases ferrita e austenita, verifica-se que nessa condição, a região interna do tubo passou algo em torno de 10 segundos acima de 700 °C como mostra a Figura 8 abaixo para os três termopares.

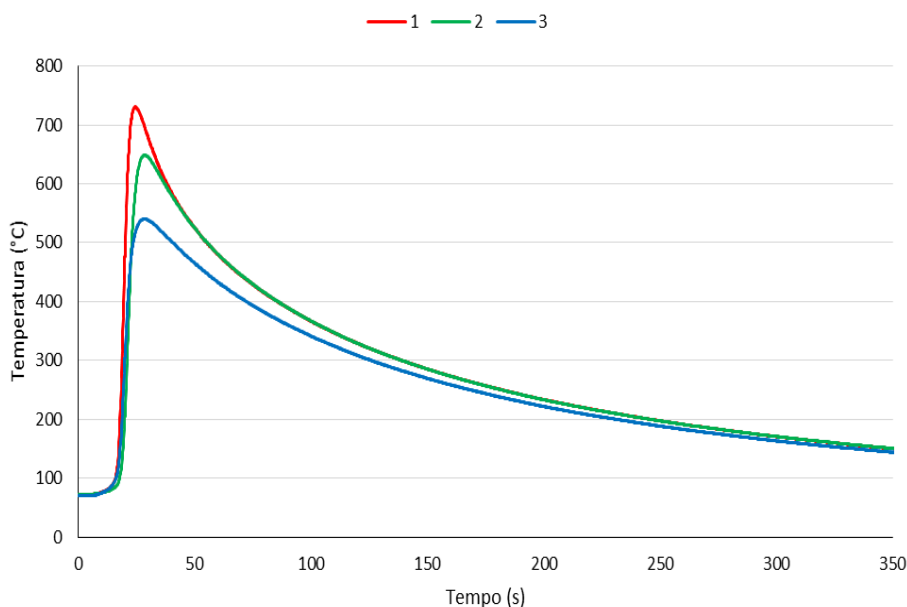


Figura 8. Curva de aquecimento e resfriamento sem água.

O estudo de Ramirez (2001) mostrou que para a formação dos precipitados, que dar-se por difusão, são necessários tempos superiores a 10 segundos em faixas de temperaturas superiores a 900 °C, de forma geral para diferentes materiais duplex. Desse modo, a amostra sem água ficou apenas 10 segundos em uma faixa menor de temperatura, o que a princípio não leva a formação de precipitados.

O experimento realizado com água no interior teve temperatura máxima de 80° C, para o termopar “1”, como demonstrado na Figura 9. Esse valor está bem abaixo do limite mínimo da curva inferior de formação de precipitados que é na faixa de 300 °C, precipitados estes, só observados em tempos extremamente elevados, quando se comparam aos tempos experimentados no processo de soldagem.

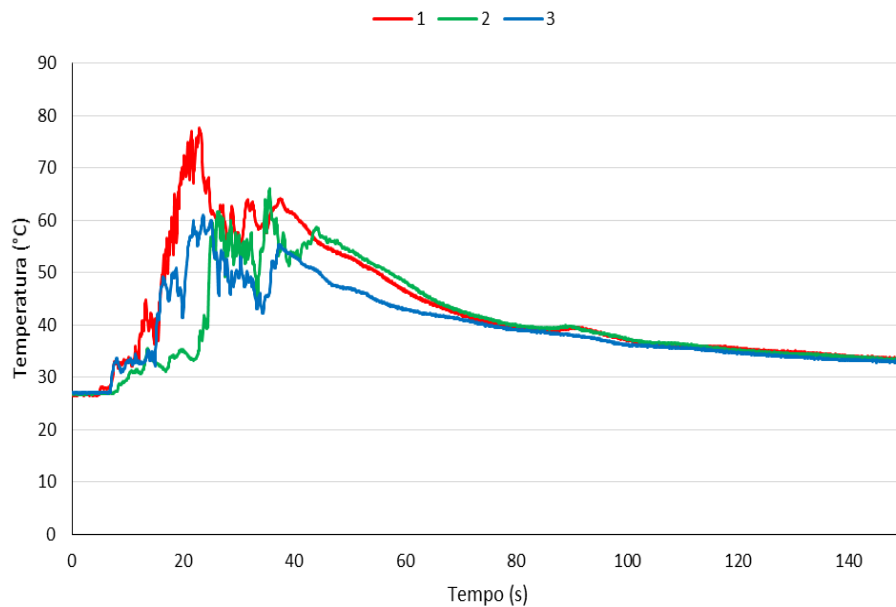


Figura 9. Curva de aquecimento e resfriamento com água.

Tomando como base a energia aplicada (mesma energia em ambas as condições), nota-se uma maior diluição na soldagem sem água interna ao tubo. Ainda é visto alguma miscibilidade entre o metal de depósito e o substrato como indicado na Figura 10 (a). No entanto, não é verificada a mudança significativa no balanço das fases presentes (escura a ferrita e a clara a austenita) como mostram a Figura 10 (a) e (b).

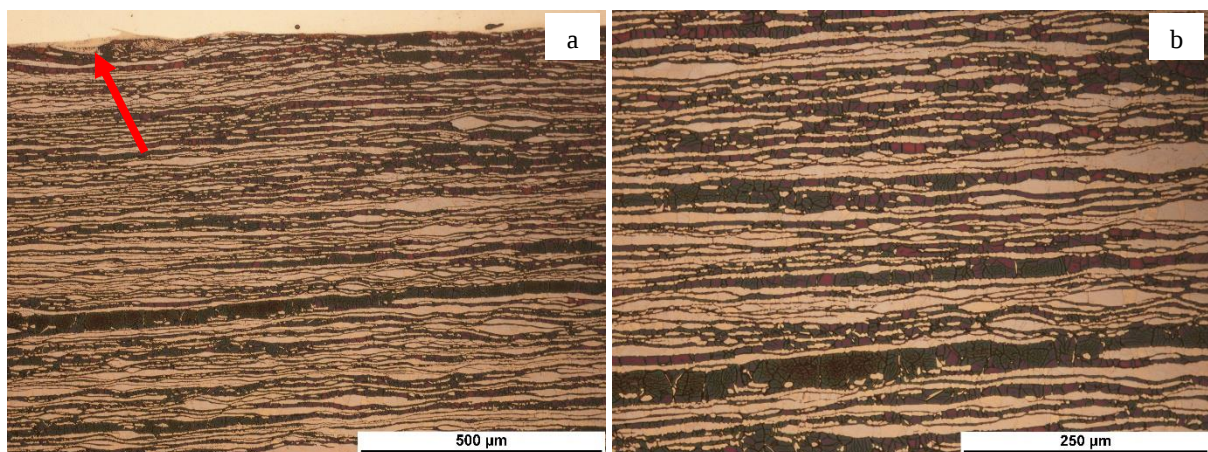


Figura 10. Cladding sem água no interior do tubo. (a) região de interface entre o Inconel 625 (depósito) e o metal de base (AISD UNS S32760). (b) região interna do tubo.

Na Figura 11 observa-se a mesma condição, mas com água no interior do tubo. Nota-se a incidência de alguma falta de fusão interpasse como destacado (Figura 11 a). A princípio, com a maior taxa de dissipação térmica, a viscosidade do metal fundido tende a ser maior, diminuindo a molhabilidade e, por conseguinte, possibilitando a incidência de pontos vazios. No entanto, tal problema não inviabiliza o procedimento como um todo, podendo, com a melhor análise paramétrica ser minimizado ou mesmo extinguido. Observando as características das fases, como granulação e proporção, pode ser identificado que não há grandes diferenças entre as duas condições apresentadas.

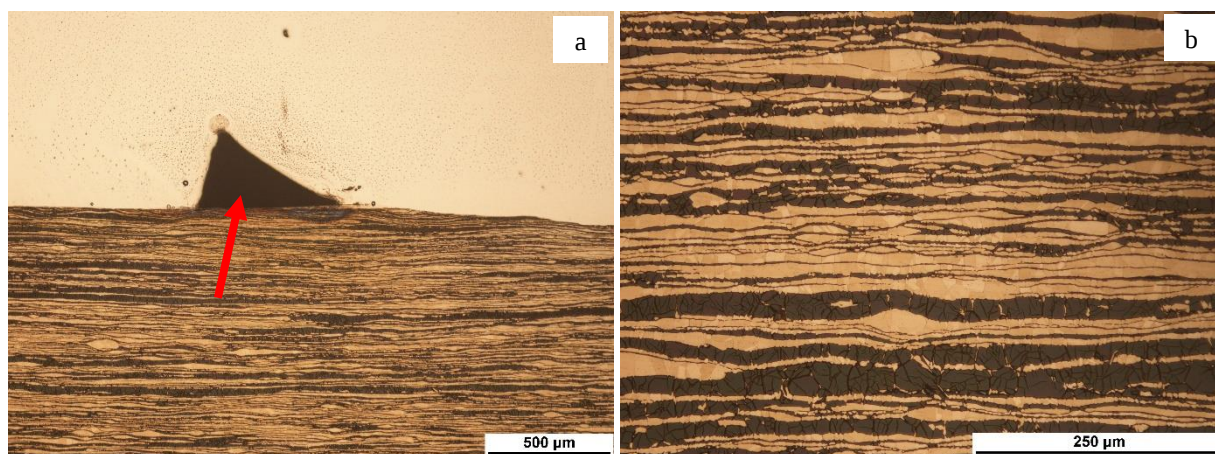


Figura 11. Cladding com água no interior do tubo. (a) região de interface entre o Inconel 625 (depósito) e o metal de base (AISD UNS S32760). (b) região interna do tubo.

A princípio não se observa mudanças significativas. Com isso supõe-se que a retirada do calor por parte da chapa de ancoragem, e também pelo passe subsequente, é bastante eficiente, tornando a técnica promissora.

Segundo Hsieh et al. (2001) na maioria das aplicações industriais, a austenita abaixo de 25% degrada as propriedades iniciais do material, tornando-o inaceitável. Ao avaliar com mais detalhes o balanço de fases, pode se perceber que para a condição sem a inserção de água no interior do tubo, observando apenas a região de interface, constata-se que a fração média de ferrita ficou em torno de 58% e 42% de austenita (Figura 12 a), enquanto que para o material com a incidência de água, obteve-se frações de 53% de ferrita e 47% de austenita (Figura 12 b). Além de uma diferença muito pequena entre as duas condições, a baixa energia aportada evitou a formação de ferrita, mostrando que a princípio, tomando como referência o balanço de fases, o procedimento apresenta-se realmente com um potencial para a manutenção desses trechos danificados.

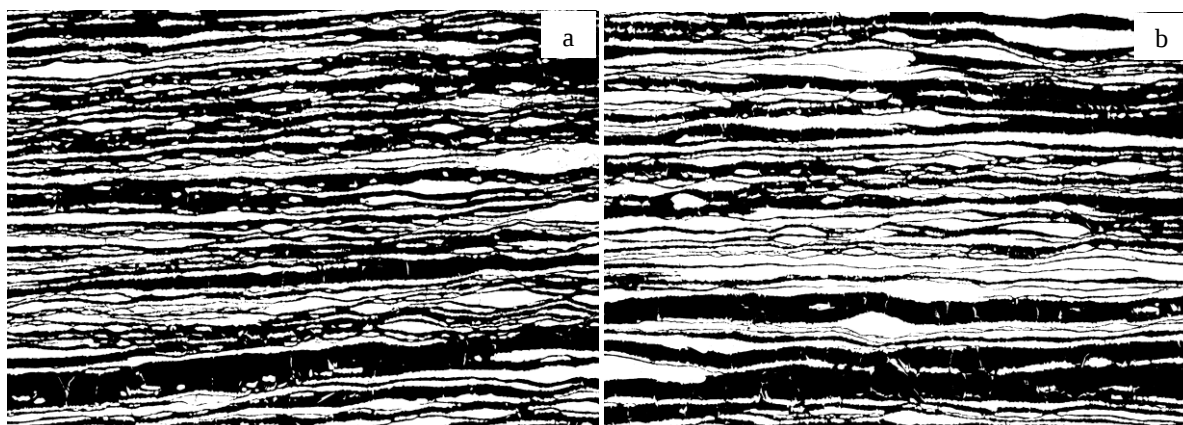


Figura 12. Imagens binarizadas do metal de base UNS S32760 soldado: sem água no interior (a); com água no interior (b).

4. CONCLUSÃO

O depósito de Inconel mostra-se adequado ao processo de recuperação de dutos degradados, mesmo para tubos com paredes finas, pois mantém o balanço de fases austenita-ferrita dentro de uma faixa ideal e não atinge temperaturas em tempos suficientes para a formação de precipitados que possam favorecer a corrosão.

A parametrização de soldagem favoreceu ao processo, mantendo-se estável e produzindo um revestimento uniforme, mesmo em níveis baixos de energia.

Os resultados mostraram foram favoráveis para as duas situações estudadas, o tubo com água em seu interior e sem água.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Petrobras e ao Laboratório de Soldagem da UFES pelo apoio e material para realizar este estudo.

6. REFERÊNCIAS

- ASME PCC-2, 2015, "Repair of Pressure Equipment and Piping – part 2: Welded Repairs", pp. 58-64.
- NACE 0175/ISO 15156 Standard, 2015, "Petroleum and natural gas industries — materials for use in H₂S- containing environments in oil and gas production – part 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion resistant alloys) and other alloys", NACE/ANSI/ISO.
- Gunn R. N., 2003, "Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications", Abington Publishing, Cambridge.
- Cleland J. H., 1996, "What does the pitting resistance equivalent really tell us?", Eng. Fail. Anal., Vol. 3, No. 1, pp. 65–69.
- Garfias-Mesias L. F., Sykes J. M., Tuck C. D. S., 1996, "The effect of phase compositions on the pitting corrosion of 25Cr duplex stainless steel in chloride solutions", Corrosion Science, Vol. 38, No. 8, pp. 1319–1330.
- Tavares S. S. M., Pardal J. M., Almeida B. B., Mendes M. T., Freire J. L. F., Vidal A. C., 2018, "Failure of superduplex stainless steel flange due to inadequate microstructure and fabrication process", Engineering Failure Analysis 84, pp. 1–10.
- Lippold, J. C., Kotecki, D. J., 2005, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", John Wiley & Sons, Inc. 1a ed., Hoboken, New Jersey.
- Ramirez, A. J. L., 2001, Precipitação de fases intermetálicas e austenita secundária na zac de soldagens multipasse de aços inoxidáveis duplex, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Pardal, J.M.; Tavares, S.S.M.; Faria, R.A. "Aços inoxidáveis Duplex (austeno-ferríticos) microestrutura e propriedades", Metalurgia & Materiais. 2008; 64: 624-626.
- Hsieh RI, Liou HY, Pan YT. "Effects of cooling time and alloying elements on the microstructure of the Gleeble simulated heat affected zone of 22% Cr duplex stainless steels", J Mater Sci Perform 2001;10(5):526–36.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INCONEL COATING IN SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL PIPES AS REPAIR FOR LOCAL CORROSION PERFORATIONS

Gabriela Vilhena Marchesi, gmarchesi02@gmail.com¹

Lucas Dias Schuller, shullerlucas@yahoo.com.br¹

Marcelo Camargo Severo de Macêdo, mcamargo0207@gmail.com¹

Marcos Lessa Kugizaki, marcoslk@gmail.com¹

Temístocles de Sousa Luz, temistocles.luz@icloud.com¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, 29075-073.

Abstract. *Superduplex Stainless Steels combine excellent mechanical strength and high corrosion resistance in the face of adverse applications, but may present corrosion problems that cause perforations in tubular applications for conduction of sea water, requiring repairs. Commonly on oil extraction platforms, the repair of these regions is made with the isolation by means of a polymeric composite bandage, for later replacement. This work brings a permanent repair alternative, which is the application of an Inconel layer by the Cladding method in the affected region. To make this process viable, it is necessary that the thermal input of the process does not reach the temperatures and times required for the formation of precipitates and, therefore, reduce the corrosion resistance. For this, low welding energy was used, monitoring the internal tube temperature during welding and metallographic analysis. The results showed that it is feasible to use the Inconel coating, since there were no conditions for the formation of the precipitates and no significant changes in the microstructure.*

Keywords: corrosion, superduplex, inconel, cladding, gmaw.