

Caracterização de Uma Junta Dissimilar entre Aço Carbono e Inconel 625 Obtida por Soldagem por Explosão

Rodrigo Andrade Ribeiro¹, Renata Barbosa Gonçalves², Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos²

¹ Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS, Indústria Para-Petrolífera – IPP, Departamento de Engenharia de Instalações de Superfície – EISUP, Unidade de Operações de Exploração e Produção na Bacia de Campos – UO-BC, Macaé, RJ, Brasil.

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

Recebido: 10 Ago., 2016

Aceito: 27 Mar., 2017

E-mails: rodrigo.ribeiro@petrobras.com.br
(RAR), renatahaa@gmail.com (RBG),
paranhos@uenf.br (RPRP)

Resumo: Neste trabalho é caracterizada uma junta dissimilar entre aço carbono e Inconel 625 obtida pela soldagem por explosão. A caracterização metalográfica foi feita com uso de diferentes ataques químicos e observação microestrutural do metal de base (MB), a interface e o revestimento de Inconel 625 por meio de microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersa (EDS). Ensaios de microdureza foram realizados em todas as regiões. Os resultados mostram forte deformação dos grãos na proximidade da interface, tanto do lado do MB quanto do lado do Inconel, tendo sido verificado significativo aumento da dureza. Na interface, ocorre o aparecimento de zonas localmente fundidas devido à dissipação de energia no impacto durante a explosão. Estas zonas apresentam microestrutura provavelmente martensítica. O trabalho conclui que o processo atinge os níveis de qualidade e produtividade característicos do segmento offshore.

Palavras-chave: Revestimento; Inconel 625 e aço carbono; Soldagem por explosão.

Characterization of a Dissimilar Joint between Carbon Steel and Inconel 625 Obtained by Explosion Welding

Abstract: In this work is characterized a dissimilar joint between carbon steel and Inconel 625 obtained by explosion welding. Metallographic characterization was made with the use of various chemical attacks and microstructural observation of the base metal, the interface and the coating of Inconel 625 by means of optical microscopy, scanning electron microscopy and spectroscopy scattered energy. Microhardness tests were performed on all regions. The results show strong deformation of grains in the vicinity of the interface, on both the base metal and the side of Inconel, where have been observed a significant hardness increase. At the interface, occurs the appearance of local fused zones due to dissipation of energy on impact during explosion. These areas show probable martensitic microstructure. The study concludes that the process reach the levels of quality and productivity characteristics of the offshore segment.

Key-words: Coating; Inconel 625 and carbon steel; Explosion welding.

1. Introdução

O desenvolvimento de tecnologias para a exploração e produção de petróleo nas plataformas “*offshore*” em águas profundas e ultra profundas, sob condições adversas, leva à necessidade de estudos visando o desenvolvimento de novos materiais ou a realização de novas avaliações para diferentes situações dos materiais já existentes [1].

No caso específico dos poços de petróleo, os equipamentos e tubulações instalados são submetidos a condições diversas de temperatura e pressão, estando inseridos em um ambiente corrosivo e/ou abrasivo. O fluido produzido constitui-se de uma mistura de compostos de petróleo, água salgada, gás natural, gases como o H₂S e o CO₂, e sólidos em suspensão, como areia. À medida que os poços são explorados, uma quantidade maior de areia é produzida juntamente com o óleo, a água e o gás [2]. Os *risers* de produção têm a função de conduzir toda a produção submarina, óleo e/ou gás, de um determinado poço ou determinado conjunto de poços num campo até a superfície [3].



Atualmente está sendo empregado em escala mundial o revestimento interno de *risers* de aço C-Mn com ligas a base de níquel para melhoria da resistência a degradação. Essa aplicação está ganhando espaço principalmente por questões econômicas, uma vez que restringe a utilização de materiais nobres somente às regiões que demandam melhores propriedades, nesse caso, à superfície interna dos tubos [4].

Diante da crescente expansão da demanda por tubulações com revestimento interno, surge espaço para a identificação de novos processos e procedimentos de soldagem que permitam ampliar as opções já existentes, adicionando novas técnicas que aumentem o nível de produção ou habilitem processos de fácil utilização em ambiente industrial [5]. Sob este ponto de vista, destacam-se: o TIG automatizado, por ser amplamente utilizado no mercado; o revestimento por co-extrusão, no qual ocorre a extrusão simultânea de dois ou mais materiais emergindo de uma matriz; os processos híbridos de soldagem, no qual ocorre a associação física de dois processos com o intuito de aproveitar as características mais atrativas de cada um. E, por fim, a soldagem por explosão, que tem como principais características: é possível unir grandes áreas em uma única operação; pode ser utilizada na união de praticamente todos os metais e ligas que possuam ductilidade suficiente para não se romper durante a explosão; e, após o material ser soldado, este retém essencialmente 100% da sua densidade teórica, não ocorrendo perdas [6].

O objetivo deste trabalho é caracterizar as microestruturas formadas ao longo de uma junta de aço carbono API 5L X-60 unida com Inconel 625 pela soldagem por explosão, tendo em vista a sua influência nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Para tanto, foram utilizadas técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e microdureza vickers, abrangendo o metal base, a zona de ligação e suas proximidades e o revestimento Inconel 625.

2. Materiais e Métodos

Neste estudo foram utilizados materiais provenientes de amostras retiradas de forma transversal ao cordão de solda de um tubo conformado a partir de uma chapa submetida ao processo de soldagem por explosão. A amostra abrange toda a extensão do metal de base e revestimento.

A Figura 1 mostra uma seção do tubo, fornecido pela empresa SCHULZ. Foi utilizado como metal de base uma chapa de aço carbono API 5L X-60, de 12 mm de espessura e como revestimento uma chapa de Inconel 625 de 4 mm de espessura. Foi retirada uma amostra abrangendo toda a superfície do Inconel 625 e do API 5L X-60. A soldagem por explosão foi realizada na empresa Multiclad Ind. Com. de Processamento de Metais Ltda.

Os seguintes ensaios foram realizados: análise microestrutural com EDS e microdureza.

A preparação das amostras para análise metalográfica envolveu as etapas de: corte, lixamento, polimento e ataque. Na avaliação do MB foi realizado ataque por imersão com os reagentes Nital 2%, Nital 5% e ácido crômico com tempos entre 3 e 5 segundos. Para avaliação da interface revestimento/substrato e do Inconel foram



Figura 1. Seção do tubo da soldagem por explosão. A parte interna do tubo (mais clara) é o Inconel 625. A parte externa (mais escura) é o aço API 5L X-60.

utilizados os mesmos reagentes, porém por meio de ataque eletrolítico, com tempo entre 10 e 13 s e tensão de 3 a 5 V. As amostras foram observadas no microscópio Confocal de varredura a laser, modelo Lext 3D OLS 4000 do fabricante Olympus e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) modelo CS 3200 LV, do fabricante CamScan.

Foram feitas medições de microdureza no metal base, no Inconel e na zona localmente fundida em toda a extensão da amostra, conforme indicado na Figura 2a para as medições no sentido vertical e na Figura 2b para as medições no sentido horizontal. O objetivo do ensaio de microdureza foi avaliar as alterações nas propriedades mecânicas. A carga utilizada foi de 100 g. Foi utilizado o microdurômetro LECO LM 247 AT para as impressões na vertical e horizontal e o microdurômetro modelo 422 MVD, do fabricante Wilson Instruments, para impressões apenas na zona localmente fundida.

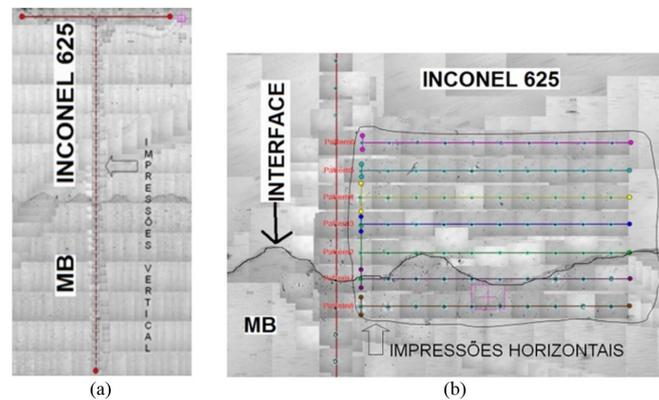


Figura 2. Esquema das impressões de microdureza na junta, para a amostra da soldagem por explosão (a) Impressões na vertical e (b) impressões na horizontal.

3. Resultados e Discussão

A soldagem por explosão é um processo de soldagem em estado sólido, na qual a união ocorre pelo impacto em alta velocidade das peças em trabalho, como resultado de uma detonação controlada. A explosão acelera o metal numa velocidade que produz uma adesão metálica entre eles após a colisão. É essencialmente um processo à temperatura ambiente em que não ocorre um grande aquecimento das peças em trabalho. As superfícies de contato, entretanto, são aquecidas pela energia de colisão, e a união é conseguida pelo fluxo plástico do metal em suas superfícies [7].

A Figura 3 mostra o MB, a interface revestimento/substrato e o revestimento de Inconel 625. Estas são as regiões em estudo. Observa-se a interface em forma de ondas, característico da soldagem por explosão [7], que tem como principal utilização aplicação em revestimentos metálicos.

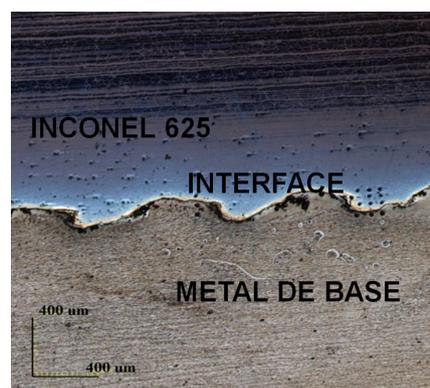


Figura 3. Regiões de interesse na amostra da Soldagem por Explosão: Metal Base: ataque com nital 2%, 5 s; inconel: ataque eletrolítico com nital 2%, 5V, 13 s. Microscópio CONFOCAL.

A Figura 4 mostra os resultados de microdureza obtidos no MB a partir de 150 μm da interface em direção à superfície da chapa. Mais próximo à interface foi observada maior dureza. As medidas de microdureza ao longo da extensão do MB variaram na faixa de 190 a 258 HV.

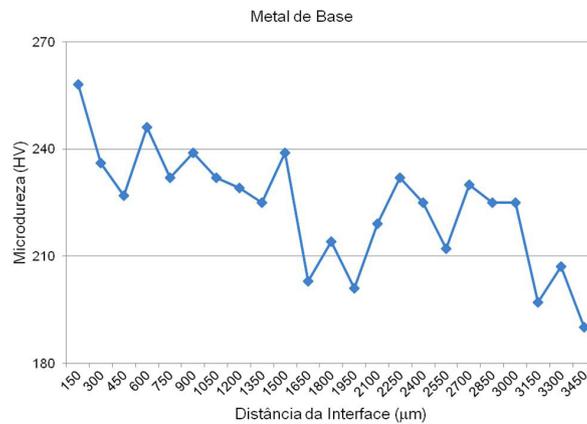


Figura 4. Microdureza no MB da junta soldada por explosão.

Observa-se uma tendência na queda da dureza à medida que se afasta da interface e se direciona para o interior do metal base. A região mais próxima da interface obteve dureza de 258 HV e na outra extremidade, região no interior do metal base, a dureza foi de 190 HV. Rajani e Mousavi [8] explicam que o aumento na energia de impacto durante a soldagem por explosão promove o encruamento nos materiais adjacentes à interface.

A Figura 5 mostra a micrografia obtida por MO, na qual se observa: o MB, a interface e uma pequena parte do revestimento. O MB é composto por grãos ferríticos (grãos claros) e perlita (grãos escuros). Nota-se que os grãos do MB estão alongados. Este comportamento também foi observado por Acarer [9], que verificou o alongamento dos grãos na direção perpendicular à explosão para amostras não tratadas termicamente. A linha amarela tracejada na Figura 5 delimita a região onde os grãos estão mais alongados pela proximidade com a interface, com largura de cerca de 20 a 40 microns. Esta é a região conhecida como zona de encruamento do MB.

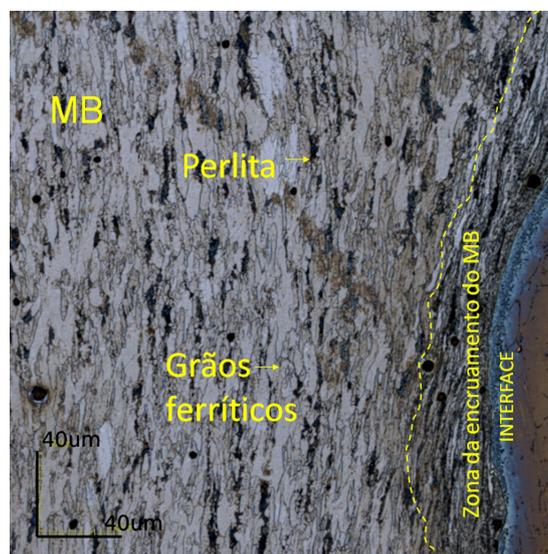


Figura 5. MB e Zona de encruamento do MB da soldagem por explosão. MO: Confocal, 1075x, ataque por imersão com Nital 2%, 5 s.

A Tabela 1 mostra as medidas de microdureza na zona de encruamento do MB. Essas foram obtidas individualmente, no microdurômetro modelo 422 MVD, disponível no CEFET/RJ. Os valores ficaram entre 255 e 299 HV, e média de 273 HV.

Tabela 1. Microdureza na zona de encruamento do MB.

Valores de microdureza na zona de encruamento do MB
292 HV ; 299 HV ; 279 HV; 276 HV; 258 HV; 265 HV; 260 HV; 255 HV

A média da microdureza na zona de encruamento do MB (273 HV) foi maior que os valores obtidos no MB. Este comportamento está de acordo com os encontrados no trabalho sobre a investigação de parâmetros de soldagem por explosão e seus efeitos sobre a dureza e a resistência ao cisalhamento [8], no qual é relatado que a microdureza é maior próximo da interface soldada devido ao excesso de deformação plástica ocorrido na área da explosão.

A Figura 6 mostra em maior aumento a zona de encruamento do MB, na qual nota-se que os grãos foram alongados devido ao processo de deformação plástica ocorrido nessa região. Assim como no MB, a microestrutura é constituída de grãos de ferrita (grãos mais claros) e perlita (grãos mais escuros).

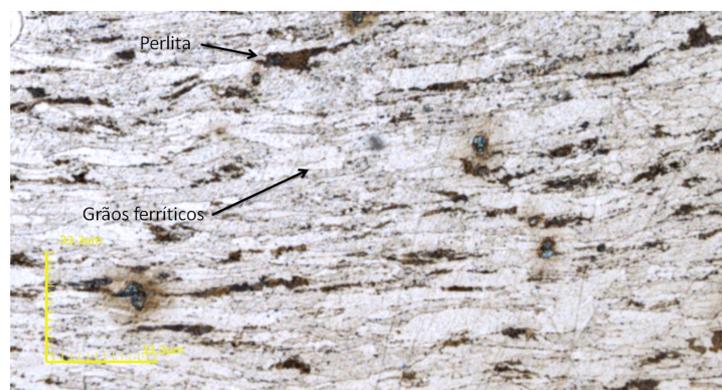


Figura 6. Zona de encruamento do MB na soldagem por explosão. Confocal, 1828x, ataque por imersão com Nital 2%, 5 s.

A Figura 7 mostra os gráficos da composição química gerado pela análise por EDS no MB e na zona de encruamento do MB. A Figura 7a, relativo ao MB, apresenta picos de Fe e C, como o esperado para este material. A zona de encruamento do MB, Figura 7b, também obteve composição química semelhante ao MB, com picos de Fe e C.

A semelhança na composição química e diferença na dureza entre o MB e a zona de encruamento do MB reafirma a posição desta diferença como consequência do trabalho mecânico aplicado na soldagem por explosão. A maior dureza da zona de encruamento do MB está relacionada à deformação plástica sofrida nessa região, gerando uma microestrutura de grãos alongadas nessa região.

A Figura 8 mostra a micrografia obtida por MO, na qual se observa: o MB com grãos ferríticos e perlíticos; a zona de encruamento do MB com os mesmos grãos ferríticos e perlíticos, porém mais alongados; a interface com uma região clara sem a presença de contornos de grão e o Inconel 625. A região da interface sem a presença de contornos de grão é denominada de zonas localmente fundidas [8,10] e na Figura 8 é indicada pela seta.

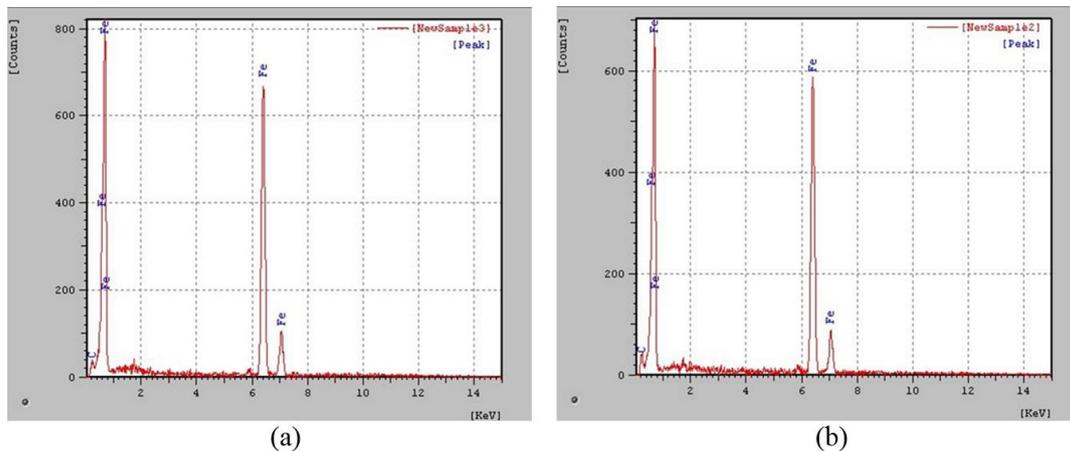


Figura 7. Análise por EDS no MB (a) e na zona de encruamento do MB (b).

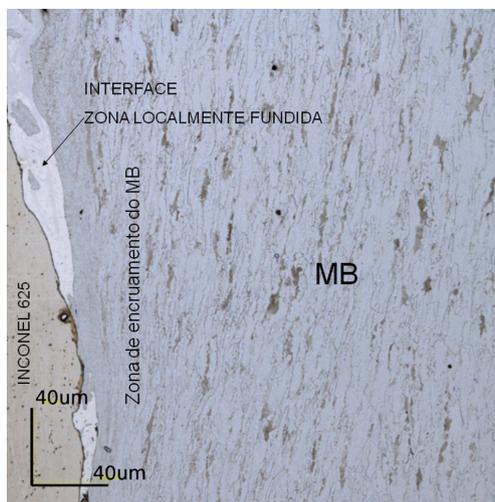


Figura 8. MB, zona de encruamento do MB, interface (região clara) e o inconel 625. Confocal, 1075x, ataque eletrolítico com Nital 5%, 3V, 10 s.

A quantidade de elementos difundidos tende a cair pelo movimento para fora da interface, em direção ao MB e a difusão interfacial deve existir, porém o fenômeno de fusão local é a melhor explicação para a formação das zonas localmente fundidas [8]. A formação das zonas localmente fundidas é atribuída à difusividade e estas se distribuem ao longo da interface. Apesar da natureza em estado sólido do processo de soldagem por explosão, a dissipação de energia devido ao impacto severo, proporciona um atrito intenso entre a camada de revestimento e o MB, o que pode aumentar a temperatura interfacial acima do ponto de fusão dos materiais [10].

As Figuras 9a e 9b mostram impressões de microdureza na zona localmente fundida. Estas foram dificultadas devido às dimensões reduzidas destas áreas. A Tabela 2 mostra os resultados das medidas na zona localmente fundida, que variou de 305 a 407 HV e média de 339 HV, valor bem superior às encontradas no MB e na zona de encruamento do MB. A faixa dos valores de microdureza da zona localmente fundida na soldagem por explosão (média de 339 HV) está na faixa de dureza característica da microestrutura martensítica.

A Figura 10 mostra a micrografia da amostra com análise EDS em linha abrangendo as regiões do MB, interface e Inconel 625. Os teores dos elementos foram alterados repentinamente, logo após a interface, isso ocorre porque na soldagem por explosão o processo é realizado no estado sólido, no qual ocorre a união de todo o revestimento e parte do metal de base. Em processos de soldagem convencionais, como o TIG, os teores de elementos são alterados gradativamente após a interface, até se estabilizarem [11].

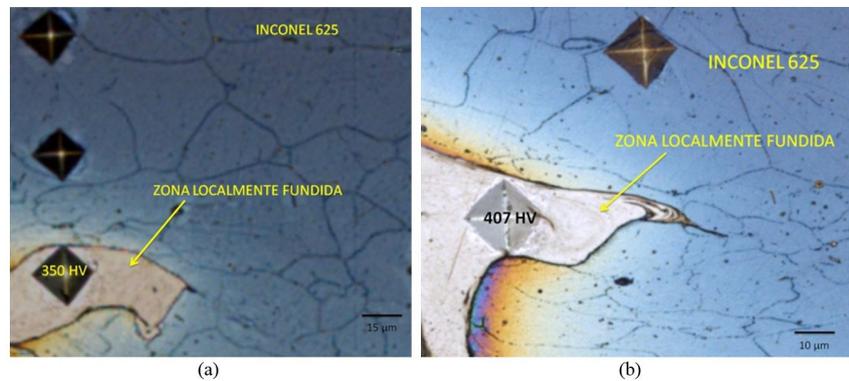


Figura 9. (a) e (b) Microdurezas na zona localmente fundida, ataque eletrolítico com Nital 2%, 5V, 10 s.

Tabela 2. Valores das microdurezas na zona localmente fundida.

Valores de microdureza na zona localmente fundida
350 HV; 407 HV; 400 HV; 318 HV
305 HV; 312 HV; 313 HV; 313 HV
Média: 339 HV

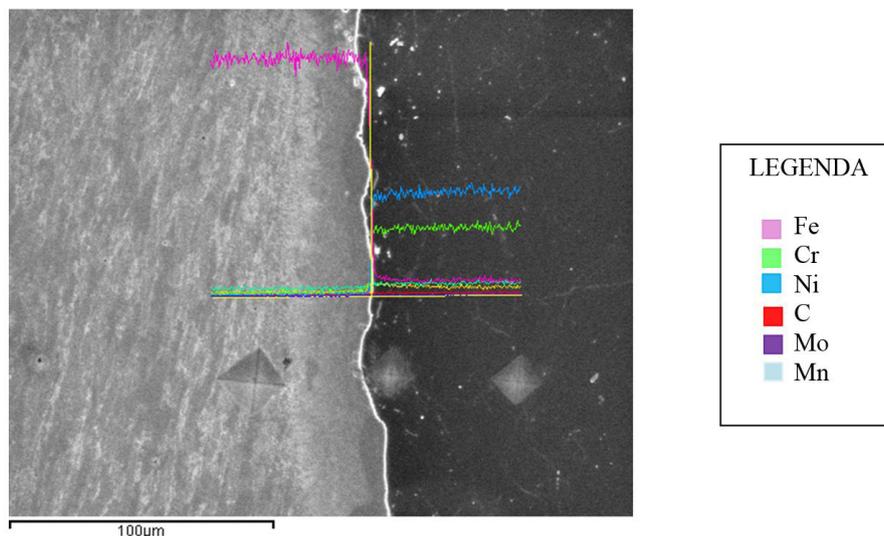


Figura 10. EDS em linha abrangendo o MB, a interface e o inconel 625. Ataque eletrolítico com Nital 2%, 5V, 10 s.

A Figura 11 mostra a micrografia por MO de possíveis áreas de aparecimento das zonas localmente fundidas, sem o aparecimento de contornos de grão. Observa-se que a distribuição não é uniforme. Isso provavelmente ocorre porque a velocidade da explosão dificilmente é uniforme ao longo da interface. As zonas localmente fundidas podem aparecer tanto do lado do MB, regiões com coloração branca indicada pelas setas, quanto do lado do Inconel 625, regiões com coloração azul claro.

A Figura 12 mostra a micrografia obtida no MEV e os gráficos da composição química gerado pela análise por EDS nos pontos 1 e 2 indicados na foto. O ponto 1, no MB, apresentou composição química igual ao MB da Figura 8, com picos de Fe e C. Já o ponto 2 apresentou teor de Cr similar ao Inconel 625, teor de Ni e Nb pouco abaixo que o Inconel 625, além de teor de Fe três vezes mais que o Inconel 625. O ponto 2, localizado em uma zona localmente fundida, apresenta composição química mista entre o MB e o Inconel 625. Ainda, como mostrado acima, a microdureza na zona localmente fundida variou entre 305 e 407 HV. Desta forma, é possível assumir que as zonas

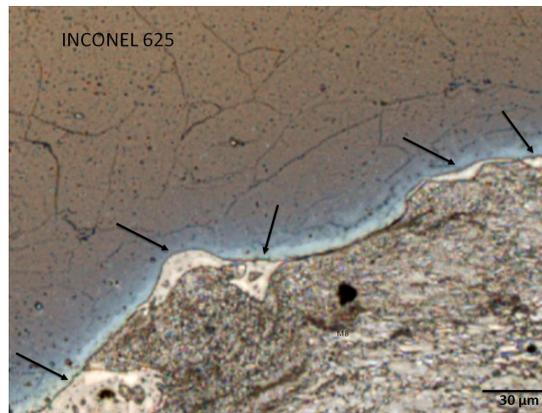
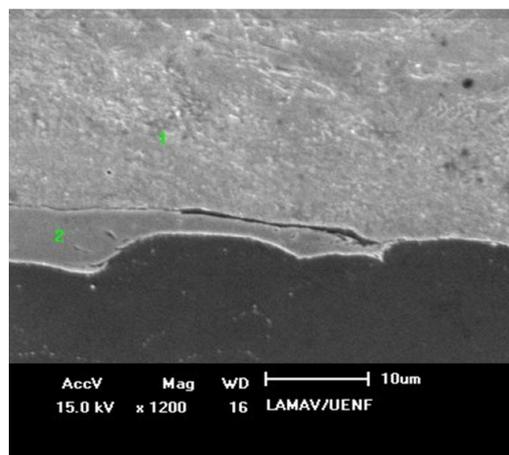
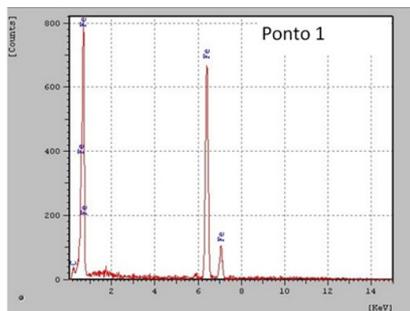


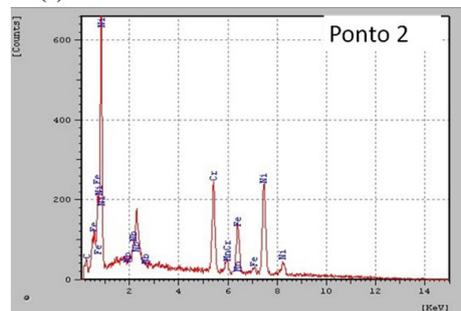
Figura 11. Possíveis zonas localmente fundidas indicadas pelas setas. Microscópio Confocal, 430x, ataque eletrolítico com ácido crômico, 5V, 10 s.



(a)



(b)



(c)

Figura 12. (a) Micrografia por MEV na zona localmente fundida, ataque eletrolítico com Nital 2%, 5V, 10 s. (b) e (c) análise por EDS nos pontos 1 e 2 indicados em (a).

localmente fundidas na soldagem por explosão apresentam comportamento semelhante às zonas parcialmente diluídas encontradas na soldagem TIG. Uma diferença é que as zonas parcialmente diluídas na soldagem por fusão com o processo TIG ocupam toda a extensão da interface [4], enquanto as zonas localmente fundidas na soldagem por explosão se distribuem apenas em pontos localizados da interface [11]. Desta forma, é possível supor que, devido a composição química e microdureza das zonas localmente fundidas, estas são constituídas de martensita.

A Figura 13 mostra os resultados das microdurezas na região do Inconel 625, a partir da interface em direção à superfície do Inconel. Nota-se que os maiores valores foram encontrados entre 150 e 600 µm de distância da interface, valores entre 387 e 443HV, com média de 420 HV.

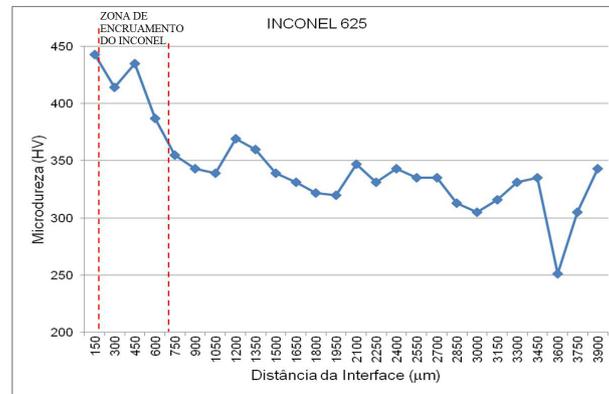


Figura 13. Síntese do perfil de microdurezas no inconel 625 ao longo da distância da interface.

A partir de 600 µm os valores de microdureza apresentaram valores entre 251 e 369 HV, com média de 330HV. Observa-se uma tendência na queda da dureza à medida que ocorre o afastamento da interface e aproximação da superfície, como também verificado no MB. Na amostra em estudo, a carga explosiva causou deformação plástica não só no MB próximo a interface mas também no Inconel 625 próximo a interface.

Isto também é relatado por Kwiecień et al. [12] em seu trabalho sobre a soldagem por explosão usando o Inconel, que associa os elevados valores de dureza no Inconel 625 próximo à interface como consequência do processo de endurecimento por deformação plástica conhecido como encruamento. Nota-se que a extensão do encruamento no Inconel ocorre até cerca de 600 µm da interface, enquanto no MB ocorre até cerca de 150 µm.

A Figura 14 mostra a microestrutura austenítica do Inconel 625 após a interface. Observa-se os grãos austeníticos com diferentes tamanhos. O formato dos grãos é alongado bem próximo à interface, conforme também observado na zona de encruamento do MB.

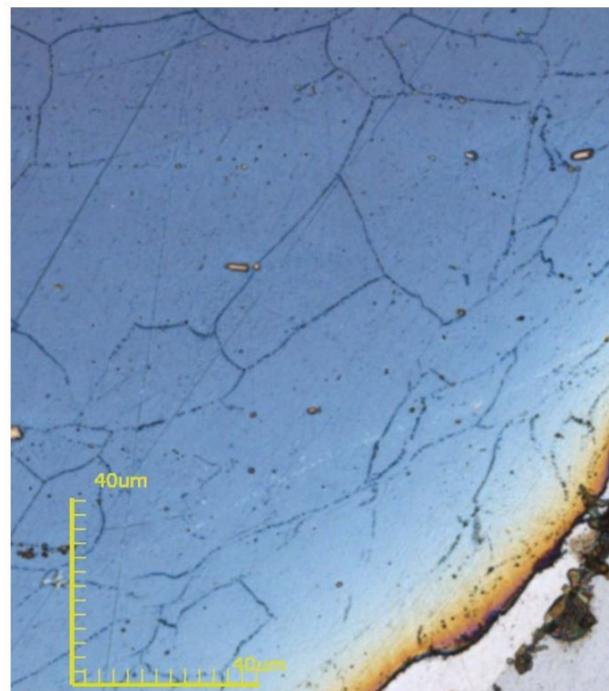


Figura 14. Microestrutura do inconel 625 após soldagem por explosão. Ataque eletrolítico com Nital 2%, 5V, 10 s.

A Figura 15 mostra a micrografia obtida no MEV e os gráficos da composição química gerados pela análise EDS nos pontos 2 e 3. O ponto 2, ponto branco localizado próximo da interface, apresentou picos de Nb e Cr, além da presença de Ni, Ti e C. Supõe-se este ponto ser um carboneto primário existente antes da soldagem. O ponto 3, ponto branco localizado mais distante da interface, apresentou quantidades de Ni e Cr menores, quantidade de Nb três vezes mais e alto teor de C, quando comparados ao Inconel 625. Supõe-se este ponto ser um carboneto primário existente antes da soldagem semelhante ao encontrado por Péres [13] na microestrutura do Inconel 625 e denominados de carbonetos primários.

A Figura 16 mostra a micrografia obtida no MEV do Inconel 625 e os gráficos da composição química gerado pela análise EDS nos pontos 1, 2 e 3. O ponto 1, região branca do contorno de grão, apresentou composição química rica em Nb e Ti, quando comparados ao Inconel 625, além da presença de Ni, Cr e C. Supõe-se este ponto ser um carboneto primário existente antes da soldagem. O ponto 2, maior região branca do contorno de grão, apresentou composição química com picos elevados de Nb, além de elevado Ti e empobrecimento do Ni e Cr, quando comparado ao Inconel 625, além da presença de C. Supõe-se que este ponto seja um carboneto primário existente antes da soldagem. O ponto 3, região escura, apresentou composição química equivalente ao Inconel 625, concluindo tratar-se da matriz austenítica.

Os carbonetos primários encontrados nas Figuras 15 e 16, como relatado por Pérez [13] aparecem nos contornos e no interior dos grãos em toda a extensão do Inconel 625, sendo estes pré-existent à soldagem.

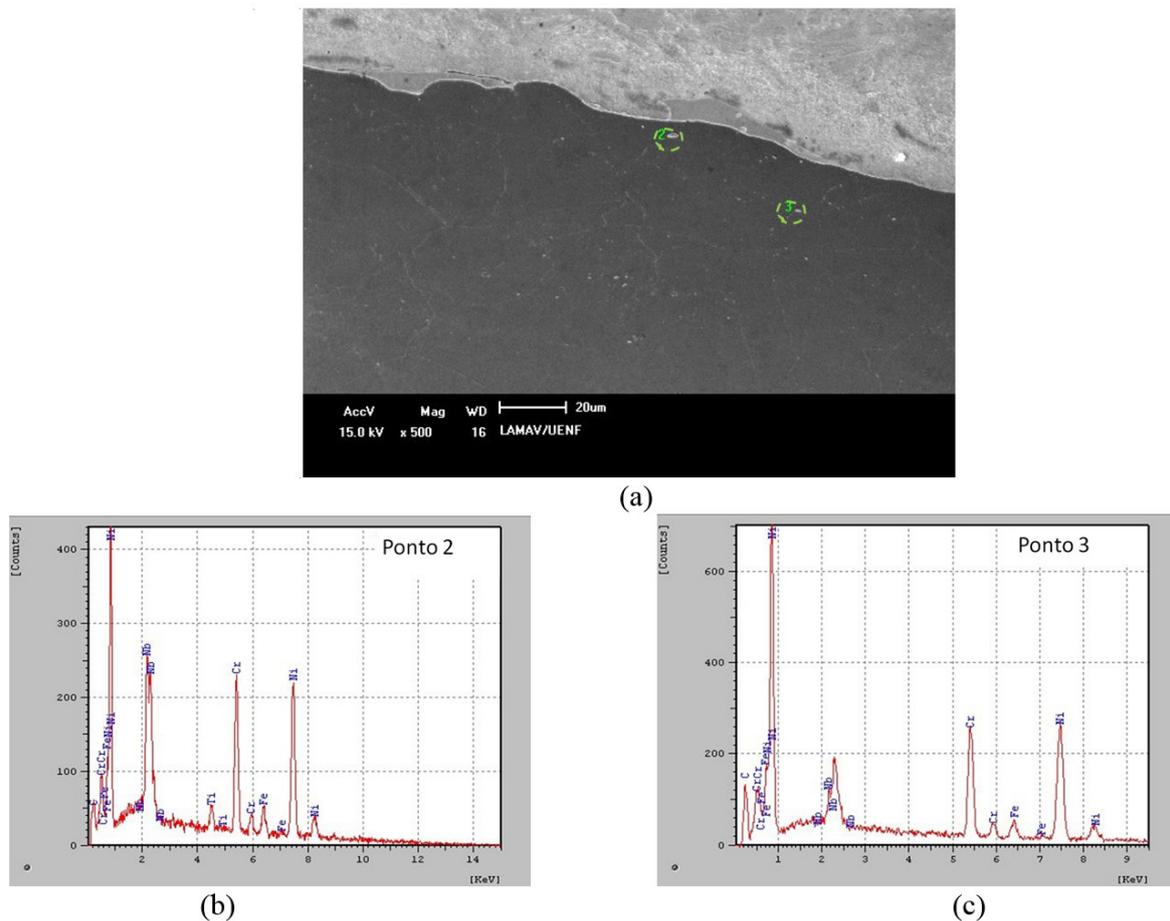


Figura 15. (a) Microestrutura no inconel 625 na região próxima a interface, ataque eletrolítico com Nital 2%, 5V, 10 s. (b) e (c) Análise por EDS nos ponto 2 e 3 indicados em (a).

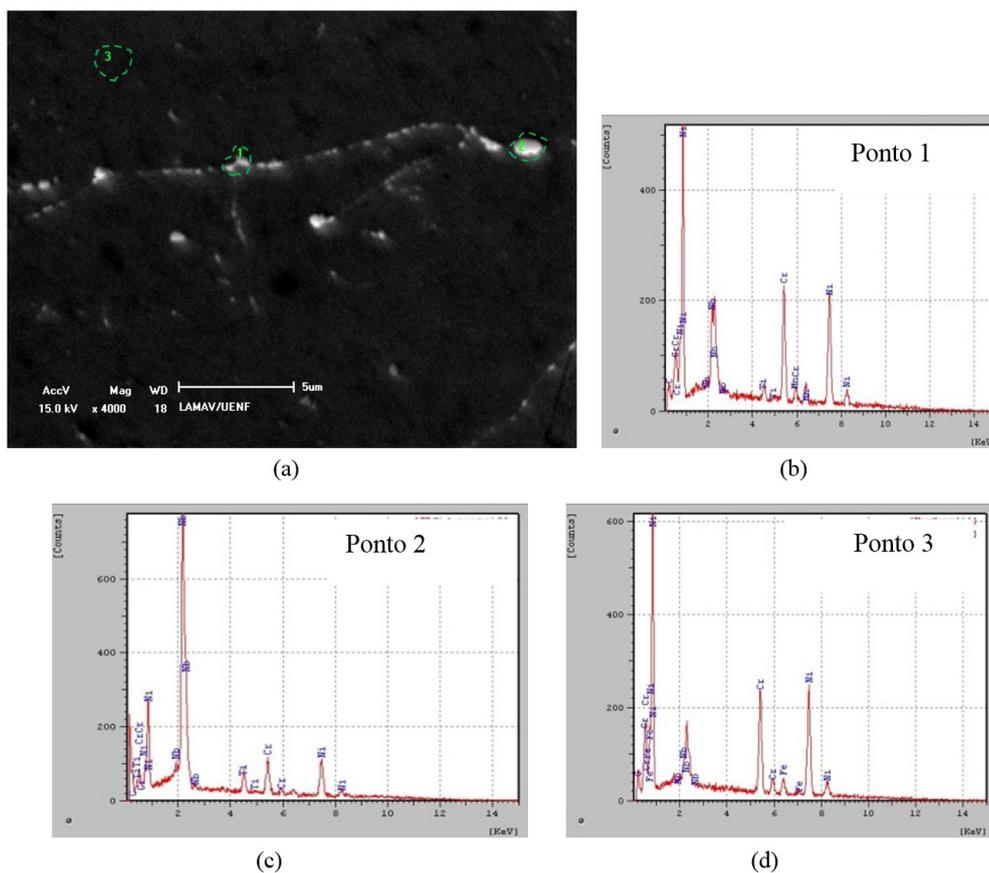


Figura 16. (a): Microestrutura no iniconel 625, mostrando outros precipitados no iniconel 625, ataque eletrolítico com Nital 2%, 5V, 10 s. (b), (c) e (d): Análise por EDS nos pontos 1, 2 e 3 indicados em (a).

4. Conclusões

Ao caracterizar as microestruturas formadas ao longo de uma junta de aço carbono unida com Inconel 625 pela soldagem por explosão, pode-se chegar às seguintes conclusões:

A deformação plástica ocorrida no MB, na região próxima a interface, conhecida como zona de encruamento, aumentou a dureza e deformou os grãos de ferrita e de perlita encontradas na microestrutura do MB.

A interface é constituída de ondas, verificadas em micrografias com baixo aumento. Em micrografias em maiores aumentos e através de análise química, verificou-se o aparecimento das zonas localmente fundidas, ocorridas pela dissipação de energia devido ao impacto severo que aumenta a temperatura interfacial próxima ao ponto de fusão dos materiais. Estas zonas apresentam composição química com a presença de elementos do MB e Inconel e com elevada dureza, característica da microestrutura martensítica.

A deformação plástica ocorrida no Inconel, na região próxima a interface, conhecida como zona de encruamento, aumentou a dureza e deformou os grãos da austenita, assim como ocorrido no MB com os grãos de ferrita e de perlita. A zona de encruamento do Inconel foi de cerca de 600 µm, enquanto no MB foi de cerca de 150 µm.

As características do revestimento tornam a soldagem por explosão do Inconel 625 sobre o aço API 5LX-65 adequadas às exigências de qualidade e produtividade do segmento offshore.

Agradecimentos

A UENF, o CENPES e o CEFET-RJ pelo auxílio para realização deste trabalho.

Referências

- [1] Pflingstag ME, Muller IL, Schaeffer L. Avaliação em relação à corrosão-fadiga de juntas soldadas da liga Inconel 625. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 2010;22(3/4):64-68.
- [2] Santos OA. Estudo da resistência a corrosão em aço e revestimentos visando aplicação em hastes de bombeio de petróleo [dissertação de mestrado]. Tiradentes: Universidade Tiradentes; 2008.
- [3] Pereira RM. Monitoração de inclinação dinâmica de risers rígidos em catenária utilizando sensores inerciais (dissertação de mestrado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2008.
- [4] Kejelin NZ. Influência dos parâmetros de soldagem na formação de zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares [dissertação de mestrado]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2006.
- [5] Baixo CEI, Dutra JC. Efeito do gás de proteção e do modo de transferência na aplicação da liga 625 em aço carbono. *Soldagem e Inspeção*. 2009;14(4):313-319. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242009000400005>.
- [6] Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. *Soldagem, fundamentos e tecnologia*. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2005.
- [7] Ziedas S, Tatini I, organizadores. *Soldagem*. São Paulo: SENAI; 1997. (Coleção Tecnológica SENAI).
- [8] Zareie Rajani HR, Akbari Mousavi SAA. The role of impact energy in failure of explosive cladding of Inconel 625 and steel. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2012;12(6):646-653. <http://dx.doi.org/10.1007/s11668-012-9601-1>.
- [9] Acarer M, Gulenc B, Findik F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. *Materials & Design*. 2003;24(8):659-664. [http://dx.doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00066-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00066-9).
- [10] Wronka B. Testing of explosive welding and welded joints: Joint mechanism and properties of explosive welded joints. *Journal of Materials Science*. 2010;45(15):4078-4083. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-010-4494-4>.
- [11] Ribeiro RA. Caracterização de juntas de aço carbono revestidas com Inconel 625 pelo processo Tig automatizado e pela soldagem por explosão [dissertação de mestrado]. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual Norte Fluminense; 2014.
- [12] Kwiecień M, Majta J, Dziedzic D. Shear deformation and failure of explosive welded Inconel-circalloyed steels bimetals. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2014;14(1):32-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2013.07.003>.
- [13] Pérez GJA. Caracterização das fases presentes em depósito de níquel ER-NiCrMo-3 em tubos de aço de 9Cr-1Mo usados em fornos de refinaria de petróleo [dissertação de mestrado]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2005.