



Efeito da introdução de um terceiro material sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas entre aço carbono e aço inox, em barras de aço para estruturas de concreto

J. C. I. Ramírez-Soto¹, J. M. Salgado-López², J. T. Pérez-Quiroz³, T. Pérez-López⁴, J. Terán-Guillén³, M. Martínez-Madrid³

¹ Instituto Tecnológico de Querétaro; Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo Col. Centro Querétaro, México.

² Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial Av. Playa pie de la Cuesta No. 702 Col. Desarrollo San Pablo Querétaro, México.

³ Instituto Mexicano del transporte Km 12+000, Carretera Estatal No. 431 "El Colorado Galindo"/ Parque Tecnológico San Fandila, Querétaro, México.

⁴ Centro de Investigaciones en corrosión, Av. Agustín Melgar S/N entre calle 20 y Juan de la barrera Col. Buenavista, Campeche, México.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i3.151>

Artículo recibido el 03 de Mayo de 2016, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 17 de Agosto de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 3, Septiembre – Diciembre 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org.

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

Este artigo investiga a influência da utilização de Inconel 182 como um terceiro material, nas propriedades mecânicas de diferentes aços inoxidáveis soldados a aços carbono com uso de eletrodo revestido. Para tanto foram usados os seguintes métodos: análise microestrutural, ensaios de microdureza Vickers e ensaios mecânicos de tensão. Tem sido empregado o processo de solda com eletrodo revestido, porque é o mais comum no campo de solda para a construção. Os resultados mostram que quando as juntas são realizadas sem esse terceiro material, as propriedades mecânicas são superiores às das juntas soldadas com auxílio do Inconel 182. Esta metodologia, ora criticada, tem sido proposta para a reabilitação de estruturas de concreto em ambiente marinho, com uso de barras de aço inox como reforços.

Palavras-chave: juntas soldadas com materiais diferentes; propriedades mecânicas; microestrutura; defeitos.

ABSTRACT

In this work, the influence of Inconel 182 as buttering material in the mechanical properties of dissimilar metal welds between plain carbon steel and stainless steel bars welded using SMAW has been investigated using microstructural analysis, Vickers microhardness testing, and tensile tests. Welding with SMAW process is commonly applied in field welding of concrete structures; therefore this process was selected for this work. The results indicated that even if the joints contain defects generated by the welder, the mechanical properties of dissimilar joint without buttering are higher than the properties of joints with buttering. This methodology is proposed for the rehabilitation of concrete structures with steel bars as reinforcements, which are located in marine environments.

Keywords: buttering, dissimilar metal weld joints; mechanical properties; microstructure; defects.

RESUMEN

En este trabajo se ha investigado la influencia de utilizar Inconel 182 como material de “mantequillado” en las propiedades mecánicas de uniones disimiles acero al carbono-inoxidable manufacturadas por soldagem con electrodo recubierto. Para ello se han empleado las siguientes técnicas: análisis microestructural, ensayos de microdureza Vickers y ensayos mecánicos de tensión. Se ha empleado el proceso de soldagem con electrodo recubierto por que es el más común en la soldagem de campo para la construcción. Los resultados demuestran que aun cuando las uniones disimiles sin “mantequillado” presentan defectos, sus propiedades mecánicas son superiores a las de las uniones soldadas con “mantequillado”. Esta metodología es propuesta para la rehabilitación de estructuras de concreto para ambiente marino con barras de acero como refuerzos.

Palabras clave: mantequillado; uniones soldadas con materiales disimiles; propiedades mecánicas; microestructura; defectos.

Autor de contacto: Trinidad Pérez (jtperez@imt.mx)

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado com aço carbono, localizadas em ambientes marinhos, se deterioram com o tempo devido à degradação das barras; o que tem sido previamente relatado por Hernandez e Mendoza (2006). No mesmo contexto, Tabatabai e colegas relataram que há duas causas para esta deterioração: carbonatação causadas pela redução da alcalinidade do concreto e a desestabilização da película de óxido de ferro devido aos íons cloreto (2009). Assim, o maior problema de barras de aço de estruturas de concreto é a corrosão.

Perez-Quiroz e colaboradores relataram que os produtos de corrosão gerados durante a corrosão do aço carbono provocam tensões de tração no concreto, que geram fissuras internas e perda da aderência entre o aço e o concreto (2008).

Como exemplo da importância da resistência à corrosão das barras de aço de estruturas de concreto, pode-se mencionar um cais de porto em Yucatan, México, que foi construído entre 1937 e 1941, cujas estruturas foram feitas de concreto com vergalhão de aço inoxidável AISI 304. O resultado é que o referida cais não exigiu qualquer reabilitação devido ao fenômeno de corrosão.

Em contraste, Klueh e King reportaram que outro cais no mesmo local, cujas estruturas de concreto foram armadas com barras de aço carbono, foi completamente danificado pela corrosão das barras de aço (1982). De igual modo, foi reportado por Istrati que para o aço inoxidável AISI 304 é um bom candidato para a produção de armaduras em concreto.



Figura 1. Comparação entre o cais feito com aço inoxidável (direita) e o cais feito com aço carbono (esquerda) (Klueh, R. L., & King, J. F. 1982).

Como mencionado acima, o estudo de diferentes materiais para substituir o aço carbono do concreto armado é uma questão muito importante, uma vez que com uma maior resistência à corrosão se aumenta a vida útil das estruturas de concreto. No entanto, os materiais propostos têm de ser unidos às barras de aço carbono para reduzir o custo e aumentar a vida útil da estrutura de concreto. Para atingir este objetivo, deve se investigar tópicos tais como a solda de metais diferentes e a preservação das propriedades mecânicas das juntas soldadas.

A soldagem de metais diferentes tem sido estudada desde 1935, mas esses trabalhos estão baseados em relatórios de falhas, investigações, entrevistas com diferentes fabricantes e usuários deste tipo de junta, a fim de reunir informações sobre essas juntas soldadas. Na literatura tem se mencionado que o tipo de bisel da junta soldada deve ser levado em consideração, a fim de se obter soldas diferentes, com boas propriedades mecânicas (Lundin, 1982).

Neste contexto, Doddy em 1992, Ospina e colaboradores relataram em 2007 que em juntas soldadas entre o aço carbono e aço inoxidável ocorre a difusão de carbono a partir do aço carbono para o aço inoxidável; Além disso, o calor proporcionado pela solda promove a precipitação de carbonetos de cromo ou de fase sigma nos limites dos grãos de aço inoxidável. Estes fenômenos devem ser evitados,

a fim de obter boas propriedades mecânicas em juntas soldadas de metais diferentes; e são feitos esforços para propor metodologias para obter as melhores propriedades neste tipo de juntas soldadas.

Por exemplo, Fuentes e colaboradores relataram as propriedades das juntas soldadas entre aço ASTM A537 e aço inoxidável austenítico AISI 304L utilizando eletrodos ER-308L como metais de adição. Neste caso, a soldagem foi realizada utilizando o processo de solda com eletrodo protegido com gás inerte (GMAW). Neste trabalho, foram relatados altos valores de dureza na linha de fusão entre a solda e o de aço inoxidável (2011). No entanto, deve se notar que o processo GMAW não é normalmente usado para a solda em obra.

Além disso, Murugan e Parmar relataram que as placas de aço ferrítico soldadas com placas de aço inoxidável, usando Inconel 625 e 725 como metal de solda. Os resultados não mostraram nenhuma evidência da difusão de carbono para o aço inoxidável, mas as juntas soldadas com tratamento térmico mostraram evidências disto (2003).

A fim de evitar a difusão de carbono para o aço inoxidável, o processo de usar um terceiro material tem sido proposto como uma solução para minimizar os problemas mecânicos e metalúrgicos deste tipo de junta. Winarto e colaboradores relataram estudos em amostras com 10 mm de espessura com processo de empregar um terceiro material, obtendo propriedades mecânicas superiores do que as amostras com 20 mm de espessura, sem adição de um terceiro. Por outro lado, a análise por macro-ataque mostrou que a zona afetada termicamente (ZAT) foi maior nas amostras com um material extra do que no caso das amostras sem esse terceiro material (2014). Neste caso, as amostras foram soldadas usando o processo GMAW em placas com bisel "V" e com eletrodos E7016 como metal de solda. O descrito anteriormente indica que não há muita informação sobre a soldagem de metais diferentes, utilizando o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) e dos efeitos do uso de um terceiro material tipo Inconel 182 como metal de solda em aço inoxidável. Neste trabalho, a influência desse terceiro material Inconel 182 é estudada nas propriedades mecânicas das juntas soldadas entre o aço carbono e do aço inoxidável usando o processo SMAW. Considerando que o processo SMAW é comumente usado na soldagem de campo, esta metodologia é proposta para a reabilitação de estruturas de concreto com armadura de aço carbono.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como primeiro passo mencionado no presente trabalho, todos os materiais, eletrodos e processos de soldagem foram selecionados por dois critérios: econômicos e aplicação de campo. Então, o processo SMAW foi selecionado por ser comum em soldagem de armaduras em obra; também foi utilizada a preparação da junta de bisel único. Os metais base foram barras de aço ASTM A615 e aço inoxidável austenítico AISI 304.

O metal de solda foi o aço inoxidável AISI 309L e o terceiro material foi realizado através da aplicação de uma camada de 2 mm sobre o aço inoxidável de Inconel 182. O eletrodo de aço inoxidável AISI 309L foi selecionado como metal de solda porque é comumente aplicado para soldar aço inoxidável, devido à sua composição química semelhante aos metais base (AISI 304). Uma vantagem é que os eletrodos AISI 309L e Inconel 182 podem ser encontrados comercialmente em eletrodos para o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) com um diâmetro de 3,2 mm para cada material. Estes eletrodos são utilizados às vezes como terceiro material nos processos GMAW e GTAW para realizar juntas soldadas entre o aço inoxidável e o aço carbono.

Além disso, o Inconel 182 foi selecionado pelo seu elevado teor de níquel e por ter um preço relativamente baixo. A introdução do terceiro material foi realizado em barras de aço inoxidável com uso de Inconel 182 para determinar o efeito deste material no aço inoxidável e ao mesmo tempo observar o efeito do AISI 309L soldado com o aço carbono. O processo de soldagem utilizado foi: soldagem com eletrodo revestido (SMAW) e foi utilizado como metal de solda AISI 309L como eletrodos. A composição química do eletrodo Inconel utilizado está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do eletrodo Inconel 182 (2003).

NiCrFe7 (182)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Fe
Composição química (%)	<0.1	<1	5-9.5	<0.03	<0.015	13-17	>59	1-2.5	<1	<10

A preparação das amostras foi efetuada de acordo com o seguinte procedimento: foram cortadas 10 barras de aço inoxidável AISI 304 e 10 barras de A615 com dimensões de 19mm de diâmetro e 100mm de comprimento como metal base para as juntas soldadas. As barras de aço inoxidável foram usinadas em 45° em uma das extremidades, fazendo bisel simples para preparar as juntas.

As 10 juntas soldadas foram preparadas de acordo com a norma NMX-H-121-1988 e ANSI/AWS D1.4-M de 2005. O Inconel foi aplicado em 5 amostras de aço inoxidável sobre o bisel de 45°. Este processo foi realizado para evitar a precipitação dos carbonetos metálicos e da fase sigma na região da soldagem. Deve se notar que o Inconel 182 contém cromo, o qual pode ser combinado com o carbono que difunde a partir do aço carbono. A máquina de soldagem utilizada no processo foia uma Castolin Eutectic, Master NT2000 AC/DC e os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 2.

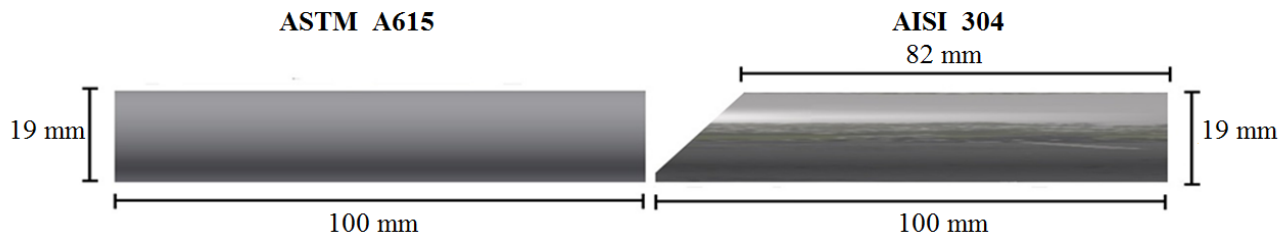


Figura 2. Diagrama esquemático do bisel simples das juntas soldadas de metais diferentes. A barra da esquerda consiste de aço carbono ASTM A615 e a barra da direita é de aço inoxidável AISI 304.

Tabela 2. Parâmetros para o processo de soldagem.

Diâmetro da barra (mm)	19
Diâmetro do eletrodo (mm)	3.2
Potencial elétrico (V)	22
Corrente (A) DC-PI	90-95
Velocidade de deslocamento (mm / min)	45
Entrada de calor (kJ / mm)	2.5

Para determinar a variação da dureza entre o metal base, metal de solda e a zona termicamente afetada, foram medidos os perfis de microdureza na direção longitudinal de cada amostra. As medidas foram avaliadas e verificadas em conformidade com a norma ASTM E384. As medidas de microdureza foram realizadas usando um microdurômetro High Quality modelo MMT-1. A carga utilizada era de 300 kgf; e o recuo observado e medido a 400X.

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados de acordo com a ASTM E8-M em uma máquina universal Instron FAST TRACK modelo 8801. As amostras foram ensaiadas a uma velocidade de 3MPa/s e a deformação foi medida utilizando um extensômetro. Finalmente, as juntas soldadas dissimilares foram caracterizadas microestruturalmente por microscopia óptica; as amostras foram preparadas de acordo com a norma ASTM E3, a microestrutura foi revelada utilizando o reagente Berahas para o aço inoxidável e NITAL 2 para o aço carbono. As microestruturas foram observadas num microscópio metalúrgico NIKON 440. As macroestruturas das amostras foram reveladas de acordo com a norma ASTM E340 e analisadas utilizando um microscópio estereográfico Leica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química do aço ASTM A615 foi determinada por meio da técnica de espectrometria de emissão óptica e os resultados foram utilizados para calcular o equivalente de carbono (Ceq) para as barras deste mesmo aço. O cálculo de Ceq foi 0,3683, que indica uma boa soldabilidade do aço carbono porque é menor do que o valor de 0,55, que é estipulado pela norma ASTM A706 / A706M. Também foi necessário calcular o cromo equivalente para o aço inoxidável (Creq), a fim de determinar a suscetibilidade do aço inoxidável para a precipitação da fase sigma. Neste caso, o valor para o Creq é maior do que 17%; então este aço é suscetível à precipitação da fase sigma na zona afetada termicamente. Isto indicou que este material não deve ser tratado termicamente, e que a entrada de calor no processo de soldagem deve ser tão baixa quanto possível. A Tabela 3 mostra os valores de Creq para o metal base e do metal de solda.

Tabela 3. Resultados de cromo equivalente.

Material	Cr eq (%)
Aço inoxidável AISI 304	19.22
Metal de solda AISI 309L	24.5

As macroestruturas das amostras soldadas foram observadas utilizando o microscópio estereográfico. Os resultados das amostras com Inconel mostraram evidência de fissuras, mas estas tiveram a sua origem na camada de Inconel. Um exemplo de amostras fissuradas é apresentado na Figura 3B; enquanto que na Figura 3A pode ser vista macroestrutura das amostras soldadas sem Inconel e nela não é observada nenhuma evidência de fissuração. Este fato indica que a diluição entre o Inconel 182 com o AISI 309L do metal de solda favorece a formação de fissuras. Este resultado é consistente com os relatados por Evans, que concluiu que ligas de níquel soldadas com aço inoxidável são suscetíveis à fissuração por calor (1962).

Neste sentido, a composição química do Inconel 182 e do AISI 309L apresentam um alto teor de níquel em ambas as ligas; por isso é possível que o níquel equivalente na soldagem aumente com a diluição entre o Inconel 182 e o aço inoxidável. Na literatura tem-se relatado anteriormente por outros autores tais como Jang, Ospina e Fuentes que uma porcentagem de ferrite entre 7 e 12% é recomendada para evitar a fissuração a quente na soldagem de aço inoxidável austenítico (Jang, C., Lee, J. H., Jung, S. Y., Kim, J. S., & Jin, T. E. 2006; Ospina, R., Aguirre, H., & Parra, H. 2007; Fuentes, A. L. G., Centeno, L., García, R. D. S., & Del Rosario, A. V. 2011).

As macrografias mostraram evidência de falhas de fusão localizadas próximas do aço carbono na soldagem de bisel único (Figura 3A). Esta é uma falha séria, uma vez que em serviço esta descontinuidade funciona como um concentrador de esforços e isto, por sua vez, leva à falha do componente soldado. No entanto, este defeito é normalmente causado pela falta de habilidade do soldador. Assim, embora o processo de soldagem seja realizado com um soldador muito qualificado, esta tenderá a gerar este defeito após algum tempo de trabalho. Outra fonte de falhas de fusão é uma baixa corrente do processo de soldagem. Neste caso, a corrente foi selecionada dentro do intervalo recomendado para a soldagem destes materiais (entre 75A e 110A); por isso, pode-se descartar esta causa para o aparecimento deste defeito. Em qualquer caso, é importante salientar que, embora as juntas soldadas apresentem defeitos de fusão, estas mostraram boa resistência à tração; o que é muito importante para o desempenho da estrutura de concreto. Isto é discutido com maior detalhe adiante.

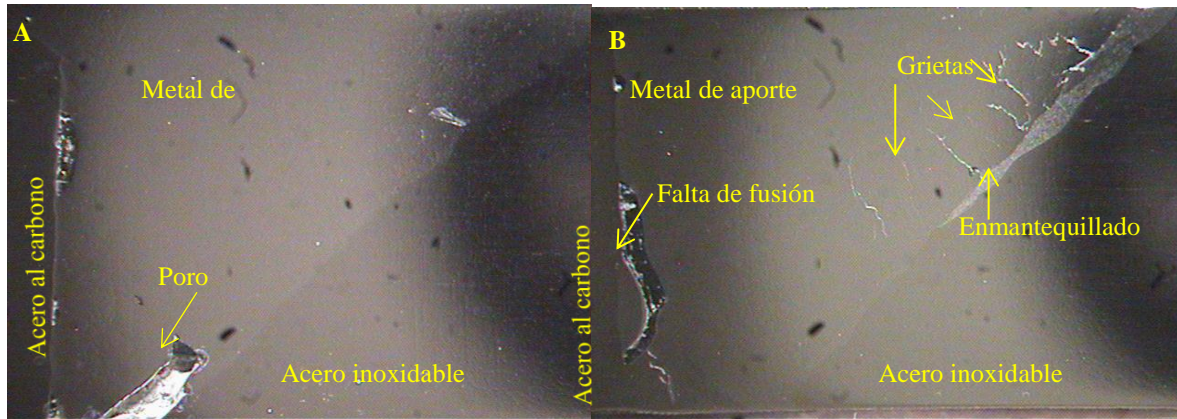


Figura 3A. Bisel simples sem Inconel. Figure 3B. Bisel simples com Inconel.

3.1 Microestruturas das juntas soldadas

A Figura 4 mostra a microestrutura do aço de carbono como metal base, podem ser vistas faixas de grãos de ferrite equiaxiais e faixas de perlite. No caso da Figura 5, esta mostra a microestrutura do aço inoxidável como metal base. Pode ser visto geminado de grãos e não há nenhuma evidência de precipitação de carbonetos metálicos ou de fase sigma.

Na Figura 6, está apresentada a zona termicamente afetada (ZAT) na interface entre o aço carbono/metal de solda. No aço carbono não é observada nenhuma evidência de crescimento anormal dos grãos de ferrite ou fissuras.

Além disso, nenhuma evidência de difusão de carbono foi encontrada a partir de aço carbono para o aço inoxidável AISI 309L. Isto é muito importante porque é consistente com os resultados publicados por Murugan e Parmar e isso indica que não há sensibilização no metal de solda. Portanto, podemos dizer que é possível soldar aço carbono com aço inoxidável usando como eletrodo de metal de solda eletrodos de AISI 309L, sem a necessidade de processo de introdução de um terceiro material como metal de solda do mesmo modo não existe qualquer evidência de sensibilização de aço inoxidável.



Figura 4. Microestrutura do aço carbono a 100X.



Figura 5. Microestrutura do aço inoxidável AISI 304 a 100X.

Na Figura 7 é apresentada a microestrutura da interface entre o aço de carbono/aço inoxidável AISI 309L; pode-se ver que não há nenhuma evidência de sensibilização nos limites dos grãos do metal de solda AISI 309L, apesar de ter sido utilizado o processo de soldagem SMAW. Isto é muito relevante considerando que o processo SMAW geralmente induz calor de solda mais elevado do que os gerados pelos processos GTAW ou GMAW.

Por outro lado, a microestrutura do aço carbono é de martensite, que é típico da microestrutura da zona afetada pelo calor nas juntas soldadas que utilizam o processo de soldagem SMAW. Nota-se que não há nenhuma evidência de fissuração na interface aço carbono/aço inoxidável AISI 309L em qualquer uma das amostras avaliadas. Isto reforça a hipótese de que é possível soldar o aço carbono com aço inoxidável pelo processo SMAW usando eletrodos AISI 309L como metal de solda.

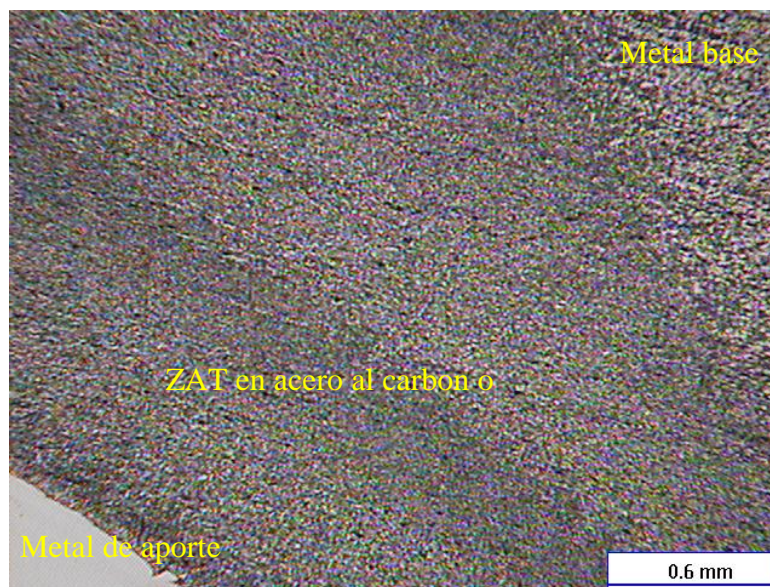


Figura 6. Microestrutura a 50X da solda entre o aço carbono e o metal de solda. Não há evidência de fissuras ou crescimento anormal do grão.

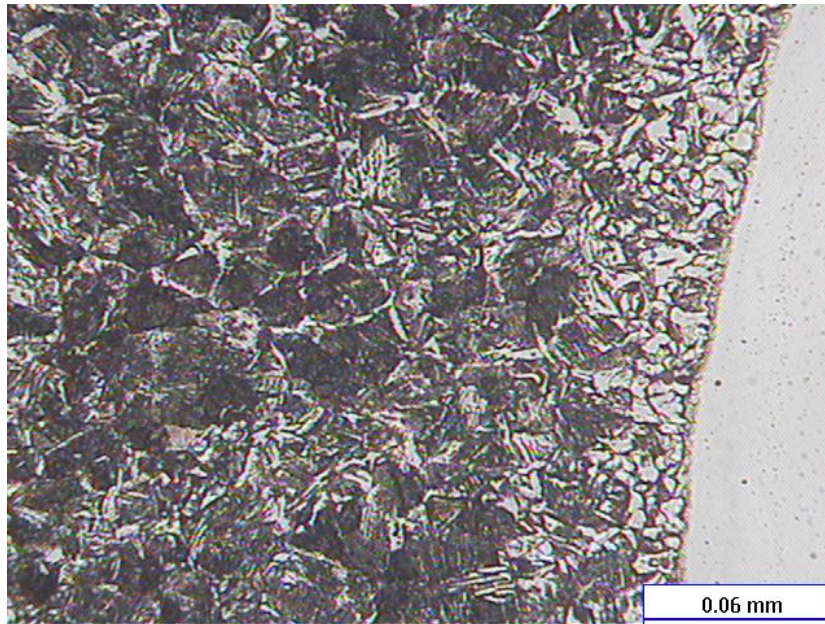


Figura 7. Microestrutura a 500X da junta soldada entre aço carbono e metal de solda. Não se verifica nenhuma evidência de precipitação de carbonetos nos limites de grão de AISI 309L.

A Figura 8 mostra a microestrutura da interface entre o metal de solda, o Inconel e aço inoxidável AISI 304. São observadas fissuras entre o Inconel e o metal de solda. Na mesma micrografia pode-se observar que a origem das fissuras está situada na interface Inconel/metal de solda. Este fato apoia a possível origem destas. Além disso, na micrografia da figura 8 também se observa a evidência de contração dos dendritos na interface Inconel/metal de solda. Por outro lado, é evidente que a contração continua crescendo na zona de diluição entre o material de manteiga e o metal de solda. Isto coincide com os resultados de Evans.

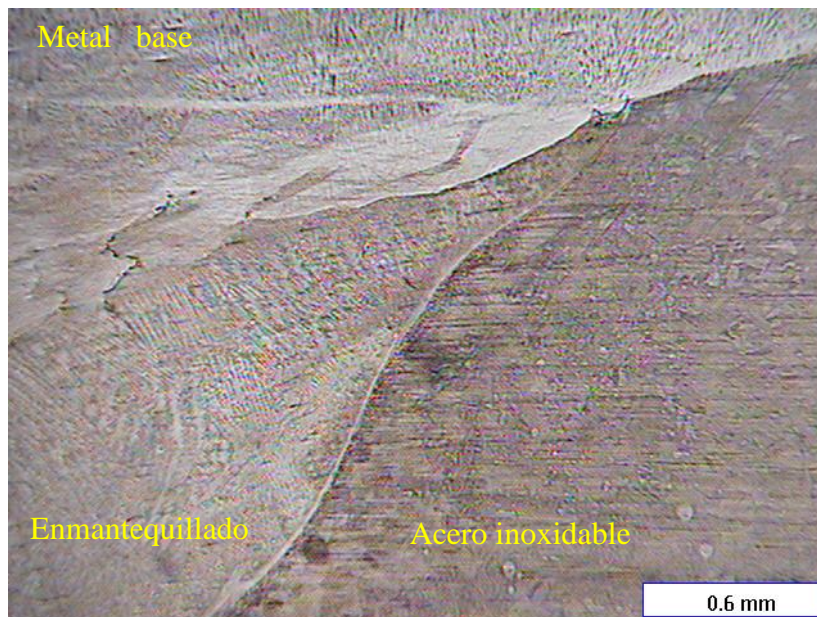


Figura 8. Microestrutura da junta soldada entre o terceiro material e o aço inoxidável. Podem-se ver as fissuras na região de diluição metal de solda / Inconel.

As evidências microestruturais discutidas anteriormente indicaram que os aços inoxidáveis austeníticos soldados com Inconel 182 são propensos à formação de fissuras. Isto indica que as armaduras de estruturas de concreto não devem ser soldadas com o uso de um terceiro material, desde e quando o metal de solda é escolhido corretamente, este problema foi discutido anteriormente na literatura (Jang, C., Lee, J., Kim, JS, y Jin, TE 2008, Olden, V., Kvaale, PE, Simensen, PA, Aaldstedt, S., y Solberg, JK 2003, Shinozaki, K., Ke, L., y Norte, TH 1992. Murugan, N., y Parmar, RS 1997). Estas evidências indicam que a porcentagem de níquel tem um papel importante na seleção do metal de solda e do terceiro material, neste caso Inconel.

3.2 Resultados de microdureza Vickers

As figuras 9A e 9B mostram o perfil de microdureza obtido na junta bisel simples. Foram encontradas diferenças entre as amostras com e sem Inconel. Por exemplo, a dureza média do material de solda é maior em uma amostra sem Inconel em relação às amostras com Inconel. Para o caso dos aços carbono, a microdureza média da amostra sem Inconel é maior do que na amostra com Inconel. Este fato está relacionado com a martensite na interface aço carbono/aço AISI 309L. Da mesma forma, pode-se mencionar que a microdureza média mais baixa no metal de solda na amostra com Inconel é uma evidência da falta de difusão de carbono. No entanto, no caso do aço inoxidável, a microdureza média é maior do que o mesmo material da amostra sem Inconel. Isto pode ser explicado pela diluição do níquel no aço inoxidável, o que provoca o endurecimento da solução sólida (Cunat, 2005).

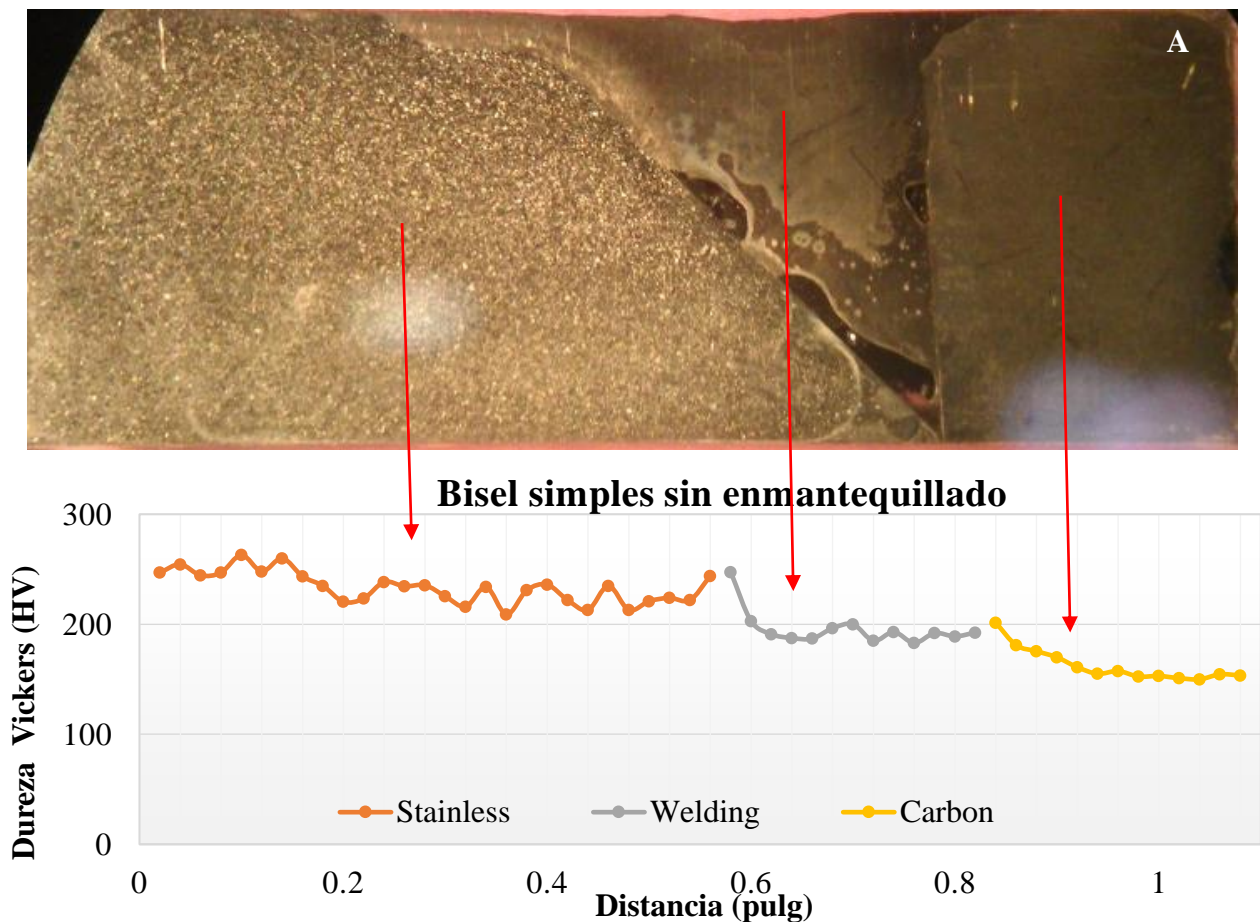


Figura 9A. Perfil de microdureza da amostra com bisel individual, junta soldada sem Inconel.

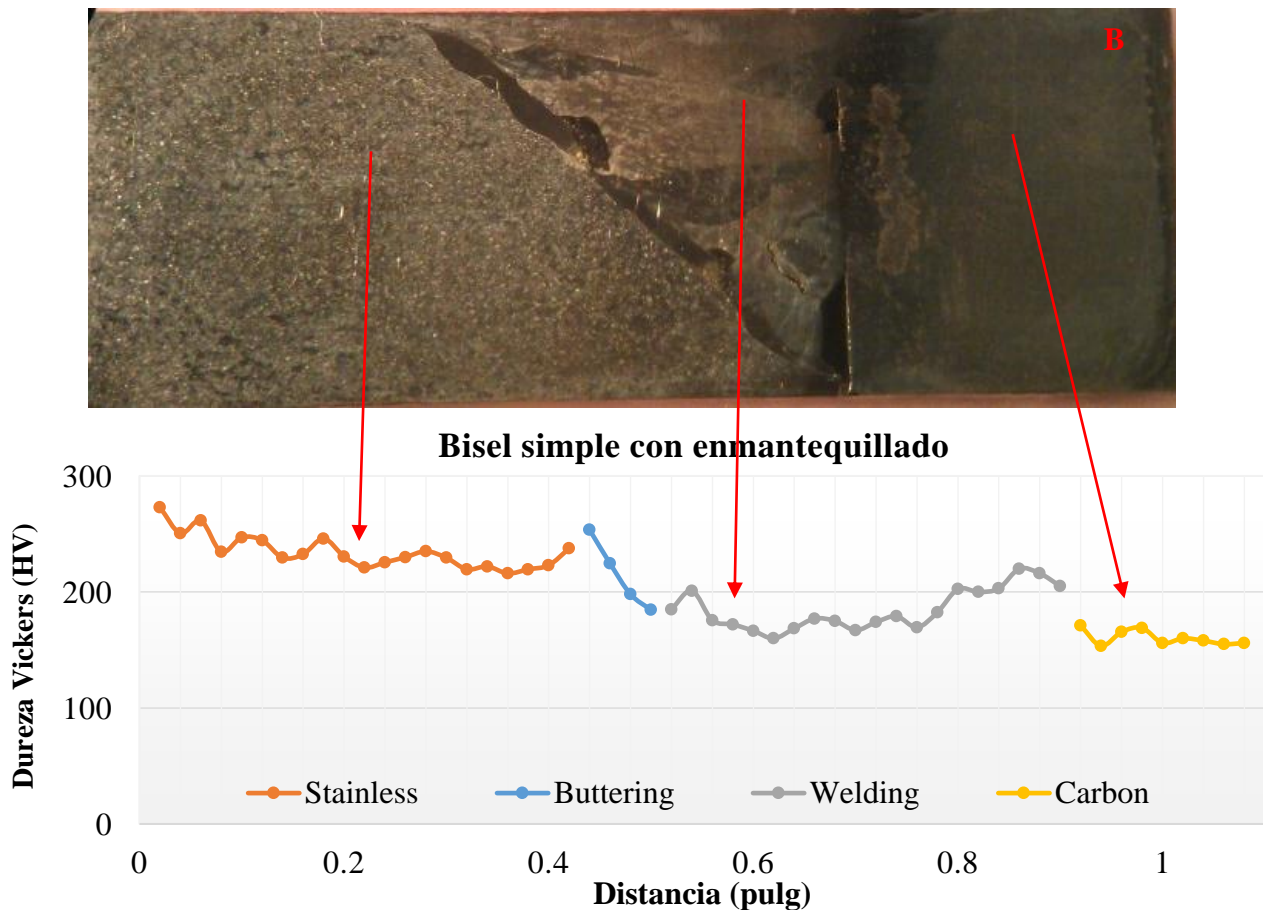


Figura 9B. Perfil de microdureza da amostra com bisel individual, junta soldada com Inconel.

3.3. Ensaio de tração

Nas curvas tensão-deformação das amostras com bisel simples, observa-se que as amostras sem Inconel apresentam uma maior resistência última à tração (RTU), que as amostras com Inconel (Figura 10). Isto é consistente com os resultados das medições de microdureza, onde se observou que as amostras mostraram valores de microdureza mais elevados na interface do aço de solda/aço carbono.

Os limites de elasticidade das amostras com Inconel são 50 MPa maior do que o limite de elasticidade das amostras sem Inconel, mas o alongamento das amostras com Inconel é maior do que no caso das amostras sem Inconel. Estes fatos podem ser explicados pelas macroestruturas, indicando que as amostras com Inconel são mais propensas a ter defeitos, tais como falta de fusão ou fissuras que atuam como concentradores de tensões, e que influenciam o comportamento mecânico durante o ensaio de tração. No entanto, é importante mencionar que, apesar da presença de defeitos, tais como falta de fusão e a porosidade, as amostras apresentaram resistência última à tração superior a 200MPa. A principal influência de defeitos está no alongamento das amostras.

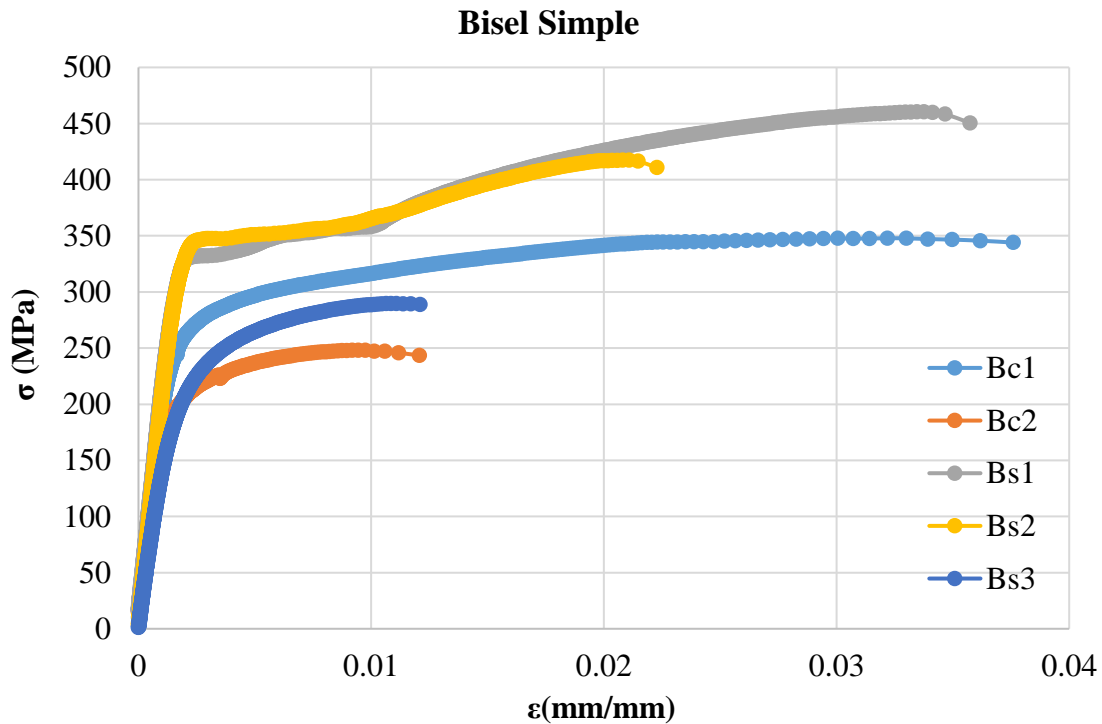


Figura 10. Curva tensão-deformação das amostras de bisel individuais. Bc1, Bc2 amostras soldadas com Inconel; Bs1, Bs2 e Bs3 amostras soldadas sem Inconel.

Enquanto a fratura das amostras, com exceção das amostras que apresentaram defeitos de solda como falta de fusão e cavidades; a fratura foi encontrada no lado do aço carbono. As figuras 11A e 11B mostram a superfície de fratura das amostras que falharam por menor esforço de tração do que as outras amostras com a mesma preparação. A influência destes defeitos sobre o comportamento mecânico dessas amostras é evidenciada por meio de soldagem que se observa na superfície de fratura das amostras. Por exemplo, a Figura 11A mostra a superfície de fratura da amostra com bisel simples e Inconel. Se mostra a origem da fratura, devido à falta de fusão, que aparece sob a forma de canais, indicadas com setas pretas. Estes resultados são consistentes com o trabalho de Jang et al. que mostram que a fratura de diferentes juntas soldadas usando Inconel como metal de solda depende em grande do processo de soldagem (Jang, C., Lee, J., Kim, J. S., Jin, T. E. 2008).



Figura 11A. Fratura da amostra com bisel individual com terceiro Inconel. Observa-se falta de fusão (seta vermelha) e cavidades (seta amarela) na fratura.

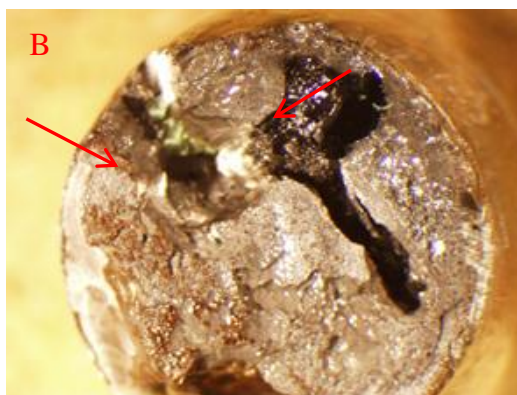


Figura 11B. Fratura da superfície da amostra com bisel individual sem Inconel. Observa-se a ausência de fusão na fratura (seta vermelha).

4. CONCLUSÕES

As evidências discutidas anteriormente levam às seguintes conclusões:

- 1.- amostras com Inconel são propensas a apresentar fissuras na interface Inconel/metal de solda.
2. A soldagem entre AISI 309L e aço carbono não apresentou evidência de formação de fissuras.
3. As amostras sem Inconel mostraram microdureza média maior no metal de solda.
4. As amostras sem Inconel apresentaram melhores propriedades mecânicas.
5. A composição química dos materiais para atuarem como terceiro material e o metal de solda são muito importantes para a integridade da solda.

5. REFERÊNCIAS

- ASTM A615 / A615M (2016), *Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement*.
- ASTM A706/A706M (2016), *Specification for deformed and plain low-alloy steel bars for concrete reinforcement*.
- ASTM E 384 (2016), *Standard test method for microindentation hardness of materials*.
- ASTM E8 / E8M (2015), *Standard test methods for tension testing of metallic materials*.
- ASTM E3 (2011), *Standard guide for preparation of metallographic specimens*.
- ASTM E340 (2015), *Standard practice for macroetching metals and alloys*.
- AWS, H. (2005), D1. 4/D1. 4M- “*Structural welding code-reinforcing*” Steel American Welding Society.
- Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Reddy, G. M., Sivakumar, K. (2011), “*Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints*”. *Materials & Design*; 32(2), pp. 469-479.
- Cunat J. P. (2004), “*Alloying elements in stainless steel and other chromium-containing alloys*”. Euroinox, p7.
- Doddy, T. (1992), “*Intermediate mixed zones in dissimilar metal welds for sour service*”. *Welding Journal*, 71, pp. 55-60.
- Evans R. M. (1962), “*Joining of nickel-base alloys*” DMIC report 181, battelle memorial institute, Columbus 1, Ohio.
- Fuentes, A. L. G., Centeno, L., García, R. D. S., Del Rosario, A. V. (2011), “*Metallurgy of dissimilar steels welded unions (ASTM A240–A537) and mechanical behavior under monotonic and cyclic loads*”. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, pp.36-48.

- Hernández-Castañeda O., Mendoza-Escobedo C. J. (2006), “*Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico*”, Ingeniería Investigación y Tecnología, VII.1 pp. 58.
- Istrati, G. (1961). “*Manual de los aceros inoxidable*”. Librería Editorial Alsina.
- Jang, C., Lee, J. H., Jung, S. Y., Kim, J. S. & Jin, T. E. (2006), “*Tensile property evaluation of dissimilar metal welds containing alloy 82/182 fusion weld using miniature specimen*”. In Proc. of KNS Spring Meeting, Chunchon, Korea. Small Sub-size Sp (Vol. 1) pp.1-23.
- Jang, C., Lee, J., Kim, J. S. & Jin, T. E. (2008), “*Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel*”. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85(9), pp. 635-646.
- Klueh, R. L. & King, J. F. (1982), “*Austenitic stainless steel-ferritic steel weld joint failures*”. WELDING J., 61(9), pp. 302.
- Lundin, C. D. (1982), “*Dissimilar metal welds-transition joints literature review*”. Welding Journal, 61(2), pp.58-63.
- Murugan, N., Parmar, R. S. (1997), “*Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding*”. Welding Journal-Including Welding Research Supplement, 76(10), pp.391-401.
- NMX-H-121-1988 “*Procedimiento de soldadura estructural acero de refuerzo*” p. 8.
- Olden, V., Kvaale, P. E., Simensen, P. A., Aaldstedt, S., Solberg, J. K. (2003), “*The effect of PWHT on the material properties and micro structure in inconel 625 and inconel 725 buttered joints*”. In ASME 2003 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, January, pp. 109-115.
- Ospina, R., Aguirre, H., Parra, H. (2007), “*Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disímiles*”. Scientia et Technica, pp.13- 34.
- Pérez-Quiroz, J. T., Terán, J., Herrera, M. J., Martínez, M., Genescá, J. (2008), “*Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation*”. Journal of Constructional Steel Research, 64(11), pp.1317-1324.
- Shinozaki, K., Ke, L. & North, T. H. (1992), “*Hydrogen cracking in duplex stainless steel weld metal*”. WELDING JOURNAL-NEW YORK-, pp. 371-387.
- Tabatabai, H., Ghorbanpoor, A. & Pritzl, M. D. (2009), “*Evaluation of select methods of corrosion prevention, corrosion control, and repair in reinforced concrete bridges*” (No. WHRP 09-04), p.p. 7.
- Tušek, J., Bajcer, B., Taljat, B. & Hrženjak, M. (2007), “*Analysis of lack of fusion in welds at water heaters*”. Metalurgija, 46(2), pp.111-116.
- Washko S. D., Aggen G. (2005), “*Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys*”, ASM Handbook Volume 1, 10th edition, pp.2145-2248.
- Winarto, G. D., Wardhani, R., Syarif, I. (2014), “*Analysis of buttering method on mechanical properties welded material low carbon steel*”. IPTEK Journal of Proceedings Series, 1(1) pp.109-113.