

## **ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DUREZA NA INTERFACE SUBSTRATO/ METAL DE SOLDA DE REVESTIMENTOS CONTRA CORROSÃO**

Gabrielly Santana Cardoso (1); Areli Mesquita da Silva (2); Jomar Meireles Barros (3);  
Divanira Ferreira Mais (4); Marcos Mesquita da Silva (5)

<sup>1</sup>UFCCG, Unidade Acadêmica de Engenharia Química, [gbriellysc@gmail.com](mailto:gbriellysc@gmail.com)

<sup>2</sup>UFCCG, Unidade Acadêmica de Estatística, [areli.mesquita@ufcg.edu.br](mailto:areli.mesquita@ufcg.edu.br)

<sup>3</sup>IFPB, Campus Campina Grande, Curso Técnico em Petróleo e Gás, [jomar.barros@ifpb.edu.br](mailto:jomar.barros@ifpb.edu.br)

<sup>4</sup>IFPB, Campus Campina Grande, Curso Técnico em Petróleo e Gás, [divaniram@yahoo.com.br](mailto:divaniram@yahoo.com.br)

<sup>5</sup>IFPB, Campus Campina Grande, Curso Técnico em Petróleo e Gás, [marcos.silva@ifpb.edu.br](mailto:marcos.silva@ifpb.edu.br)

### **Introdução**

A Soldagem é atualmente o principal processo de fabricação usado na união permanente de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Apesar de ser considerada como um processo de união, é perceptivo que processos de soldagem vêm sendo utilizados para a deposição de material sobre uma determinada superfície com a finalidade de recuperar peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais, que chamamos de soldagem de revestimento. Este interesse é pelo fato de que revestimentos com propriedades desejadas podem ser produzidos de forma rápida e econômica, através de um procedimento de soldagem (BATISTA et al., 2010). Os resultados têm tornado essa aplicação bastante atrativa, na medida em que superfícies resistentes à ambientes corrosivos podem ser produzidos a partir de materiais comuns e de menor custo.

Porém, alguns problemas metalúrgicos podem ser encontrados, que podem ser decisivos na resistência à corrosão dos revestimentos aplicados por soldagem, que é o nível de diluição do substrato no metal de solda, uma vez que, quanto maior os valores de diluição implicam em uma maior probabilidade de precipitação de microestruturas frágeis e susceptíveis a corrosão ao longo de todo o volume do metal de solda. Devido a esses problemas é importante que seja realizado análises de dureza em revestimento contra corrosão (CUNHA et al., 2011).

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é analisar a dureza de revestimento contra corrosão aplicando ferramentas estatísticas básicas.

### **Metodologia**

O processo de soldagem utilizado, para a aplicação dos revestimentos, foi o processo ao arco submerso (SAW), mecanizado com eletrodo (ERNiCrMo-4) e um fluxo neutro, básico e aglomerado para soldagem SAW. Os revestimentos foram depositados sobre um substrato de aço API 5L Gr B. Para isso, alguns parâmetros de soldagem foram estabelecidos, por exemplo, velocidade de alimentação, voltagem, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça.

Após as soldagens realizou-se o procedimento convencional de metalografia que consistiu de corte, lixamento, polimento, ataque químico, análise e registro das microestruturas. Os ataques químicos utilizados foram Nital (1,5%) para o aço API 5L Gr B, e

água régia fluorada (45% $\text{HCl}$ , 25% $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) para a liga de Ni (ER NiCrMo-4). Por fim, realizou-se nas amostras ensaios de microdureza vickers de acordo com duas metodologias. A primeira consistiu de medidas realizadas próximas à linha de fusão (LF) do lado do MS. Para isso, usou-se uma carga de 0,05kg (50g) por um tempo de 15 segundos, com espaçamento 250  $\mu\text{m}$  entre impressões. Esta primeira metodologia foi empregada com a finalidade de identificar possíveis zonas de elevada dureza na interface revestimento/substrato. Já a segunda metodologia consistiu em realizar nas amostras ensaios de microdureza nas superfícies dos revestimentos a uma altura de 3 mm do revestimento, com o objetivo de associar a dureza com os resultados de corrosão. A carga utilizada nessa metodologia foi de 300g por 15s.

Em seguida, os resultados de microdurezas, para as duas metodologias, foram analisados através de ferramentas estatísticas básicas tais como histogramas e diagramas *box plot*.

## Resultados e Discussão

Os principais resultados de dureza na interface, indicados pelos histogramas, foram: o revestimento RT1 apresentou a maior quantidade de medidas (54%) na faixa de 200 a 250HV; o revestimento RT2 mostrou a maior quantidade de medidas (55%) também na faixa de 200 a 250HV; já o revestimento RT3 indicou a maior quantidade de medidas (51%) na faixa de 150 a 250HV. Outro patamar interessante de analisar são valores de dureza acima de 300HV, que caracterizam a possibilidade de microestruturas frágeis na interface do revestimento. Assim, os revestimentos RT1, RT2 e RT3 apresentaram, respectivamente, 3%, 9% e 2% das medidas acima de 300HV. Diante do exposto, verifica-se que o revestimento RT2 apresentou a maior quantidade de medidas de dureza acima de 300HV, enquanto o revestimento RT3 apresentou a menor quantidade.

Observando os *box plots* da Figura 1(a), temos que as durezas medianas sob as condições RT1, RT2 e RT3 são 204,0 HV, 207,8 HV e 199,2 HV, respectivamente, indicando que 50% das medições em cada situação são menores do que a respectiva dureza mediana, consequentemente, os outros 50% são maiores do que a mediana.

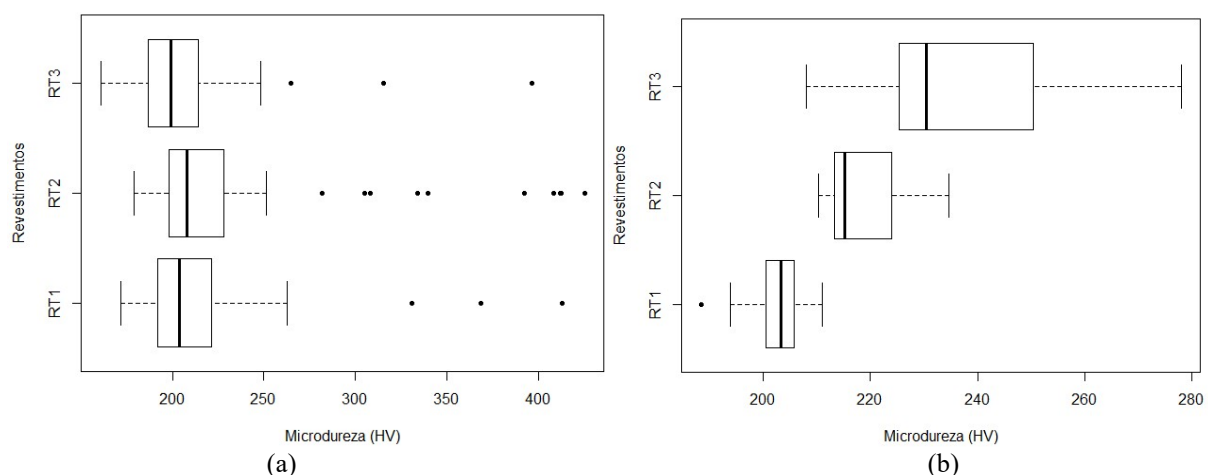


Figura 1: (a) Diagrama *boxplot* com os resultado de microdureza na interface e na (b) superfície dos revestimentos RT1, RT2 e RT3.

Considerando as respectivas distâncias interquartílicas ( $dq = q_3 - q_1$ ) sob as condições RT1, RT2 e RT3, a saber, 29,2; 30,3 e 27,7, temos que os dados sob a condição RT2 apresentaram a maior dispersão, enquanto que os dados sob a condição RT3 apresentaram a menor dispersão.

Quanto a assimetria, os 3 conjuntos de medições são assimétricas à direita, isto é, as medições são mais dispersas acima da mediana.

Podemos observar também a ocorrência de dados atípicos (discrepantes) nas três situações, ou seja, são dados bastante diferentes dos demais. Sob as condições RT1 e RT3 ocorreram 3 pontos atípicos em cada, já sob a condição RT2 ocorreram 9 medições atípicas. Esses valores atípicos, geralmente, acima de 300HV, estão associados a um fenômeno indesejáveis denominado de Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD) que ocorrem aleatoriamente na interface revestimento/substrato quando da soldagem dissimilar (KOU e YANG, 2007). Os dados dos histogramas corroboram com os resultados do diagrama *box plot* no sentido de que o revestimento RT2 apresentou a maior quantidade de ZPDs, enquanto o revestimento RT3 apresentou a menor quantidade. Isto pode estar associado aos valores de tensão de soldagem apresentado por cada revestimento. Ou seja, os revestimentos RT1, RT2 e RT3 apresentaram, respectivamente, os valores de 38,22, 37,64 e 40,56 volts de tensão de soldagem. Assim, o menor valor tensão proporcionou a maior dispersão nos resultados de dureza na interface (RT2), enquanto a maior tensão favoreceu a menor dispersão valores de dureza (RT3)

Analisando a Figura 1(b) – relacionada às medidas de durezas realizadas na superfície – as durezas medianas sob as condições RT1, RT2 e RT3 são 203,35 HV, 215,20 HV e 230,40 HV, respectivamente. Isto significa que metade das medições, em cada situação, são inferiores à respectiva mediana, enquanto que, a outra metade das medições são superiores.

As distâncias interquartílicas em cada condição são as seguintes: 5,15 HV, 10,7 HV e 25,05 HV. Isto significa que as medições sob a condição RT3 apresentaram maior variabilidade, enquanto que, as medições sob a condição RT1 apresentaram menor variabilidade.

Quanto à assimetria, os dados sob as condições RT2 e RT3 são assimétricos à direita, ou seja, apresentam maior dispersão acima das respectivas medianas. Já os dados sob a condição RT1 são assimétricos à esquerda, isto é, as medições que são menores do que a mediana apresenta maior variabilidade do que as que são maiores do que a mediana.

Podemos observar a ocorrência de apenas um valor atípico, pertencente ao conjunto das durezas sob a condição RT1, indicando a ocorrência de uma medição muito menor do que as demais.

Apesar da variabilidade nos valores de dureza na superfície, nota-se que não houve valores acima de 300HV. Isto indica que não ocorre a formação de ZPDs na superfície do revestimento. E, pelos resultados apresentados, nota-se que, em geral, o revestimento RT3 obteve o maior nível de dureza na superfície. E isto pode ser justificado pelos níveis de diluição (D) e teor de ferro (Fe) apresentados pelos revestimentos ( $D_{RT1}=24,30\%$ ;  $D_{RT2}=17,225\%$ ;  $D_{RT3}=14,29\%$ ;  $Fe_{RT1}=25,94\%$ ;  $Fe_{RT2}=15,40\%$ ;  $Fe_{RT3}=14,67\%$ ). Isto é, devido ao menor percentual de Fe, o revestimento RT3 apresentou o maior nível de dureza na superfície.

Os resultados dos histogramas, para a dureza na superfície, concordaram com esses resultados dos *box plots*. Ou seja, RT3 teve 55% das medidas acima de 230HV, enquanto RT2 apresentou 10% e RT1 não apresentou nenhum valor de dureza acima de 230HV.

## Conclusões

- Diante do que foi analisado nos resultados conclui-se que os resultados de dureza na interface revestimento/substrato são estatisticamente mais dispersos quando comparados àqueles valores de dureza obtidos na superfície dos revestimentos. Isto aconteceu devido a fenômenos metalúrgicos denominado de zonas parcialmente diluídas que só ocorrem na interface de revestimento/substrato quando da realização

de soldagens dissimilares. Constatou-se que um menor valor de tensão de soldagem pode ter provocado um menor nível de mistura na interface revestimento/substrato, favorecendo o surgimento de mais ZPDs. Assim, quanto maior foi a tensão menor foi a dispersão das medidas de dureza na interface dos revestimentos.

- Quanto à dureza na superfície, constatou-se apenas um valor atípico, enquanto que na interface ocorreram vários pontos atípicos, bem maiores do que as demais medições. Este comportamento é explicado pela não ocorrência de ZPDs – ou quaisquer outros fenômenos metalúrgicos de efeito similar – na superfície do revestimento.
- Observou-se que as ferramentas estatísticas utilizadas neste trabalho permitiram, satisfatoriamente, análises qualitativas e quantitativas dos valores de dureza obtidos nas interfaces e superfícies dos revestimentos.
- O revestimento RT3, em termos metalúrgicos, foi o que apresentou os melhores resultados já que mostrou uma menor dispersão e menores quantidades de medidas acima de 300HV. Além disso, apresentou uma menor quantidade de ferro.

## Referências

BATISTA, V. R.; SILVA, M. M.; MACIEL, T. M.; MELO, R. H. F.; ARAÚJO, F. S.; SANTOS, M. A. **Influência dos Parâmetros de Soldagem Sobre as Características de Revestimentos de Liga Níquel Aplicados em Aços API 5L Gr B**. Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia dos Materiais – CBECiMat. Campos do Jordão-SP, 2010.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 9ª edição. São Paulo: Saraiva, 2017.

CUNHA, M. C. D.; MELO, R. H. F.; BATISTA, V. R.; SILVA, M. M.; MACIEL, T. M. **Avaliação dos parâmetros de Soldagem sobre Revestimentos de Liga de Níquel em Duto de Aço API 5L Gr B**. XXXVII Congresso Nacional de Soldagem – Consolda. Natal-RN, 2011.

KOU, S.; YANG, Y. K. Fusion-Boundary Macrosegregation in Dissimilar-Filler Welds. **Welding Journal**, v. 86,n. 10, p. 303-312, 2007.