

AVALIAÇÃO DA DUREZA E MICRODUREZA DE UMA JUNTA SOLDADA DISSIMILAR

FABRÍCIO JOSÉ NÓBREGA CAVALCANTE^{1*}, JOSÉ GONÇALVES DE ALMEIDA², ESDRAS CARVALHO DA COSTA³, SAULO MORETTI ARAÚJO DUARTE⁴, SEVERINO JACKSON GUEDES DE LIMA⁵

¹Dr. em Engenharia Mecânica, Professor, UFERSA, Mossoró-RN, fabriciocavalcante@ufersa.edu.br

²Dr. em Engenharia Mecânica, Professor, UFPB, João Pessoa-PB, jga@ct.ufpb.br

³Ms. em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa-PB, esdrasjb@yahoo.com.br

⁴Ms. em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa-PB, saulo20mad@yahoo.com.br

⁵Dr. Pesquisador, Professor, UFPB, João Pessoa-PB, jackson@ct.ufpb.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: O processo de soldagem é um dos processos de fabricação mais importante utilizado na indústria. Algumas aplicações da engenharia utilizam juntas soldadas com materiais diferentes, juntas dissimilares. Neste contexto, a avaliação das propriedades dessas juntas, torna-se importante para um melhor entendimento e avaliação dessas juntas. Uma das condições para essa avaliação é a determinação da dureza e microdureza. Desta forma, o trabalho vem avaliar a dureza e microdureza do aço AISI 8630M amanteigado com e sem tratado termicamente e da junta soldada dissimilar (aço AISI 8630M amanteigado com tratamento térmico e o aço ASTM A-36). O estudo fez-se necessário em função da verificação de uma possível formação e localização das zonas frágeis no material. Os resultados de dureza obtidos para o material sem tratamento térmico mostraram uma dureza média de 24 HRC para a ZAC, e após o tratamento térmico apresentou uma redução na dureza de aproximadamente 11 %. Os resultados demonstram que a ZAC do material amanteigado é a região de maior dureza na composição no material amanteigado e na junta dissimilar, mantendo-se, com pequena elevação, o valor obtido pelo material antes da soldagem. Como efeito comparativo para as condições da distribuição da microdureza: sem tratamento térmico, com tratamento térmico e para a junta soldada, os resultados foram similares aos obtidos para o ensaio de dureza.

PALAVRAS-CHAVE: soldagem, ZTA, dureza.

DISCRIMINATION OF PLUVIOMETRIC SCENARIOS USING GAMMA INCOMPLETE DISTRIBUTION AND KOLMOGOROV-SMIRNOV TEST

ABSTRACT: The welding process is one of the most important processes used in the manufacturing industry. Some applications engineering using welded joints with different materials, dissimilar joints. In this context, the evaluation of properties of these joints, it is important for a better understanding and evaluation these joints. One of the conditions for this assessment is to determine the hardness and hardness along the dissimilar joint. This study is to evaluate the hardness and microhardness AISI 8630M steel buttered with and without heat-treated and the dissimilar weld (AISI 8630M buttery heat-treated steel and ASTM A-36). The study was necessary to understanding of the influence of the welding process and heat treatment for stress relief, to obtain the welded joint, with the identification of a possible formation and location the areas fragile, resulting from the process welding. The hardness results obtained for buttering material without heat treatment showed an average hardness of 24 HRC for the ZAC buttery material and after the heat treatment showed a reduction in hardness of approximately 11%. With the hardness to 22 HRC. The results demonstrate that ZAC buttery material is the region of greatest hardness in the composition buttery material and dissimilar joint, the value obtained by the material before welding. As a comparative effect for the conditions of distribution of microhardness: without thermal treatment with thermal treatment and the welded joint, the results were similar to those obtained for the hardness test.

KEYWORDS: Welding, Heat Affected Zone, statistics, hardness.

INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação baseado em forças microscópicas e pode ser descrito como a união entre dois materiais, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão, visando obter uma união de duas ou mais peças, assegurando, principalmente, a continuidade das propriedades mecânica ao longo da junção. A soldagem é considerada um dos principais processos usado na união permanente de peças metálicas com diversas aplicações, sendo versátil, em termos dos tipos de ligas metálicas e na utilização das várias espessuras de materiais que podem ser unidas.

Durante a união de materiais por soldagem, a aplicação de calor é inevitável, podendo-se ter alterações na microestrutura do material, não necessariamente, desejáveis e aceitáveis. Muitas das vezes, a temperatura atingida durante o processo ocasiona alterações nas propriedades do material, alterações essas, sofridas durante a solidificação e resfriamento do material, tais fenômenos podem envolver transformações de fases no material e conseqüentemente alterações metalúrgicas (MARQUES et al., 2009).

Aplicações com diversos parâmetros e diversas condições de processo, são observadas na soldagem. A união entre dois materiais diferentes, classificada como soldagem dissimilar, sendo um tipo de soldagem amplamente utilizado em juntas de aço carbono, aços inoxidáveis e ligas de níquel nas indústrias exploradoras de petróleo, por exemplo. A aplicação desse tipo de junta justifica-se da seguinte forma: Substituição de materiais ao longo do uso por materiais mais nobre ou mais atual; Uso de materiais diferentes por mudança de temperatura ao longo de estruturas; Acoplamentos de válvulas ou componentes nas tubulações.

Em aplicações de juntas soldadas com materiais dissimilares, nas regiões próximas a linha de fusão, ocorre à diluição do metal de base com o metal de adição, resultando numa composição intermediária entre os materiais envolvidos e o metal de adição, com alterações nas propriedades relacionadas a cada tipo de material, além da própria influência do metal de adição na composição da junta.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação da dureza e microdureza seguiram os requisitos técnicos especificados pelas normas API-6A (2010) e NACE MR0175, avaliando-se o aço AISI 8630M amanteigado com aço carbono ER80S-D2, com e sem tratamento térmico e avaliando a junta soldada dissimilar. Para a avaliação, seguiu-se a determinação da dureza e microdureza na junta soldada no plano transversal ao amanteigamento e a solda.

Para a determinação da dureza, utilizou-se um durômetro de fabricação Mitutoyo HR-300. Seguiram-se os requisitos técnicos especificados pelas normas NACE MR0175 e API-6A, avaliando-se o aço AISI 8630M amanteigado e a junta soldada (constituída pelos aços ASTM A-36 e AISI 8630M). Para a avaliação do aço amanteigado, o ensaio foi realizado na região transversal e longitudinal ao amanteigamento da chapa, juntamente com a determinação da dureza na junta soldada no plano transversal a solda.

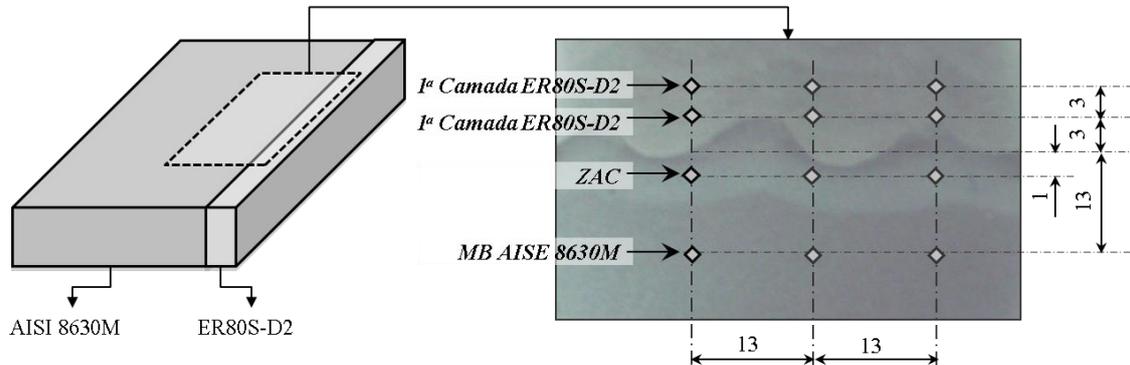
Os ensaios de dureza foram realizados em três etapas para um melhor acompanhamento e avaliação dos resultados na determinação da dureza do aço AISI 8630M amanteigado com e sem tratamento térmico de alívio de tensões, além da junta soldada, constituída pelos aços AISI 8630M e ASTM A36. Na Tabela 1 é verificado o plano de ensaios para cada situação citada e as normas utilizadas como procedimentos.

Tabela 1. Plano de ensaios de dureza

Etapa	Condição	Plano do ensaio	Norma utilizada
1 ^a	AISI 8630M amanteigado STTAT	Longitudinal	API-6A (2010)
		Transversal	
2 ^a	AISI 8630M amanteigado CTTAT	Longitudinal	
		Transversal	
3 ^a	Junta soldada	Transversal	NACE MR 0175 (2005)

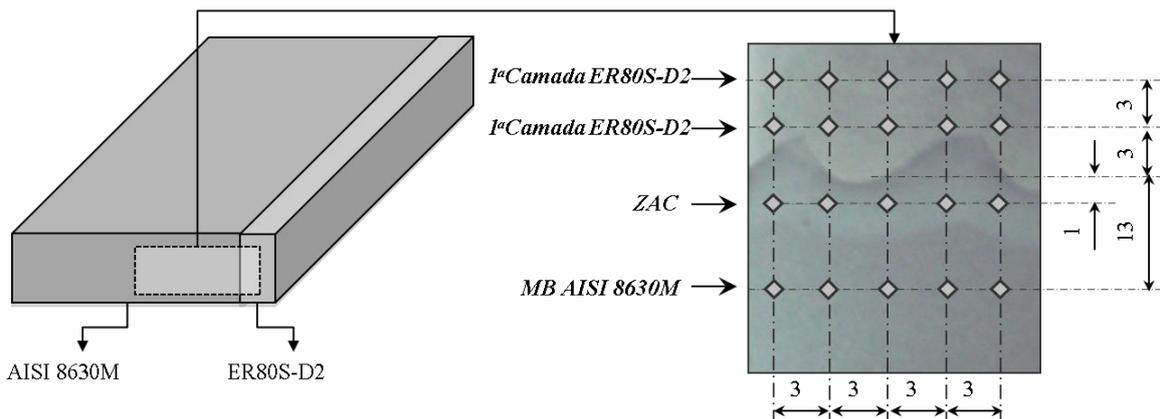
Nas Figuras 1 e 2, verifica-se o método utilizado para a realização do ensaio de dureza para as regiões longitudinal e transversal, respectivamente, do aço AISI 8630M amanteigado. A avaliação verificou-se para cada condição com e sem o tratamento térmico de alívio de tensões. Para fins de análise, a escala utilizada nos ensaios foi à dureza HV (*Vickers*) sendo o ensaio referenciado inicialmente pela LF – Linha de Fusão, e tendo as medidas em relação à LF.

Figura 1. 8630M amanteigado com ER80S-D2 – Plano longitudinal - dureza, (medidas em mm).



Fonte: adaptado da Norma API-6A (2010).

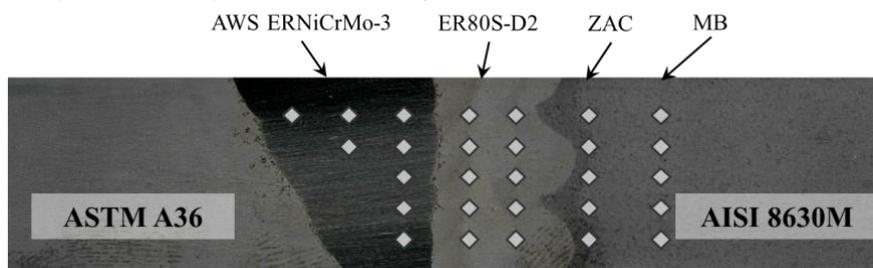
Figura 2. 8630M amanteigado com ER80S-D2 – Plano transversal - dureza, (medidas em mm).



Fonte: adaptado da NACE MR 0175 (2005).

Na determinação da dureza ao longo da junta soldada, seguiram-se os mesmos procedimentos do material amanteigado, conforme a configuração da Figura 3. No entanto a análise foi realizada em toda a junta, com destaque para a região de maior interesse, definida como ZAC de amanteigamento, uma vez que alguns problemas de fratura em campo foram evidenciados nessa região.

Figura 3. Localização das medições de dureza da junta soldada.

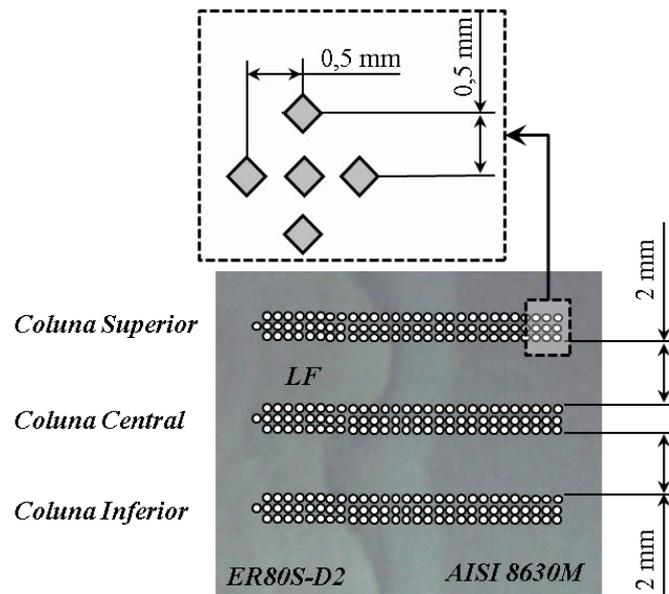


Fonte: Cavalcante (2014).

A determinação da microdureza justifica-se pela necessidade de avaliar a dureza de constituintes individuais de uma microestrutura, analisando a existência de fases frágeis no material, além de avaliar a linha de fusão ou zona de ligação entre o metal de solda e o metal de base. A amostra para a análise foi preparada metalograficamente com embutimento em baquelite. Realizando-se o ensaio em um microdurometro de fabricação SHIMADZU HARDNESS TESTERS HVM – 2 SERIES, em escala HV 0.1, utilizando um tempo de 15 segundos.

No ensaio, utilizou-se uma lente de aumento para medição das diagonais. Foram realizadas análises do aço AISI 8630M amanteigado com ER80S-D2 e nas condições: STTAT e CTTAT, e realizou-se o ensaio no plano perpendicular ao cordão de amanteigamento. No ensaio, foram realizadas 180 impressões de microdureza *Vickers* (HV), distribuídas em três colunas contendo 60 impressões, extraindo-se uma média entre cinco leituras, dispostas, segundo a formação ampliada da Figura 4, objetivando uma maior precisão no ensaio em cada região. Para a identificação de cada coluna, foi definida a coluna inferior como a mais próxima do passe de raiz da soldagem com o aço ASTM A36.

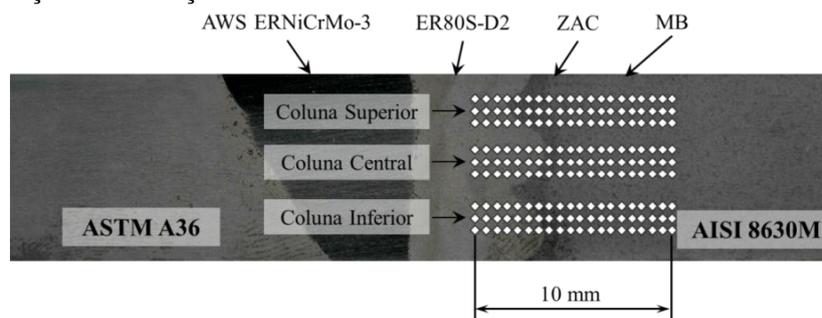
Figura 4. Perfil do ensaio de microdureza do aço AISI 8630M amanteigado com ER80S-D2.



Fonte: Cavalcante (2014).

Para a avaliação da junta soldada e avaliação da ZAC com suas interfaces, entre o MS e MB, adotou-se o mesmo procedimento realizado para o material amanteigado, conforme se verifica na Figura 5, mantendo-se as mesmas distâncias adotadas. Tendo-se como referência inicial a linha de fusão, LF.

Figura 5. Localização das medições de microdureza.



Fonte: Norma DNV-OS-F101 (2008).

Na determinação da microdureza, bem como da dureza, no material amanteigado e após o processo de soldagem, o estudo fez-se necessário em função de um melhor entendimento da influência do processo de soldagem e do tratamento térmico de alívio de tensões, até a obtenção da junta soldada, com a identificação de uma possível formação e localização das zonas frágeis ao longo do material processado.

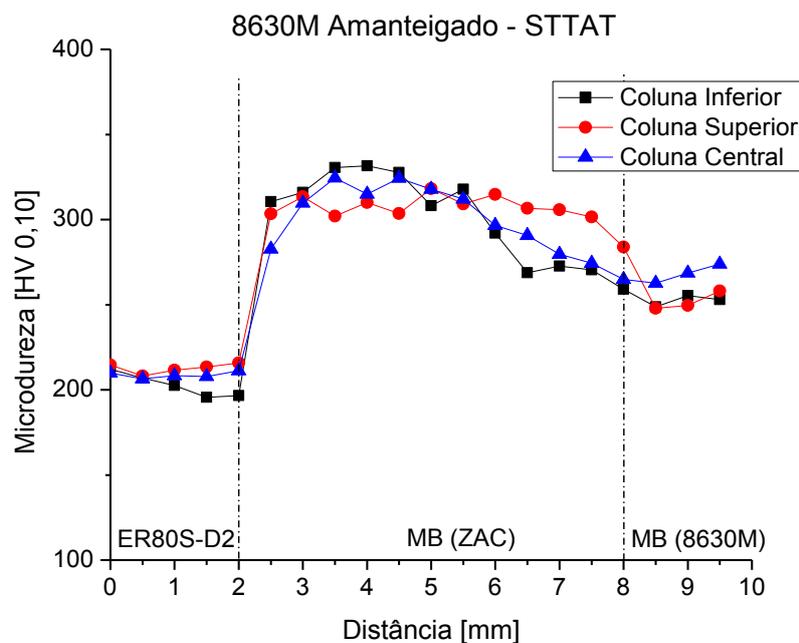
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a avaliação da microdureza HV 0,10, os resultados foram obtidos em três condições: aço 8630M amanteigado: STTAT (sem tratamento térmico de alívio de tensão), CTTAT (com tratamento térmico de alívio de tensão) e o perfil da microdureza da junta soldada.

Microdureza sem tratamento térmico (8630M STTAT)

Na Figura 6, mostram-se as medidas de microdureza do aço AISI 8630M amanteigado e sem o tratamento térmico de alívio de tensão. Todos os ensaios seguiram a metodologia da norma DNV OS E101 (2008) que definem em três eixos as indentações para o ensaio. Conforme os valores obtidos, verificam-se na região da ZAC, alguns valores de microdureza próxima ao valor de 350 HV, e que para um melhor controle nas regiões não é recomendados valores desse nível por favorecer a possibilidade de fratura frágil no material.

Figura 6. Perfil de microdureza no aço 8630M amanteigado – STTAT



Na Tabela 2 pode ser verificada a média e o desvio padrão das medidas realizadas, separada para cada região, conforme Figura 6, a ser verificado o MS (metal de solda ER80S-D2), ZAC (zona afetada pelo calor) e MB (metal de base, AISI 8630M). Na avaliação, observa-se um maior valor médio na ZAC compreendida entre 2 a 5 mm, apresentando um valor médio de 303 HV.

Tabela 2. Médias das microdurezas do aço 8630M amanteigado - STTAT

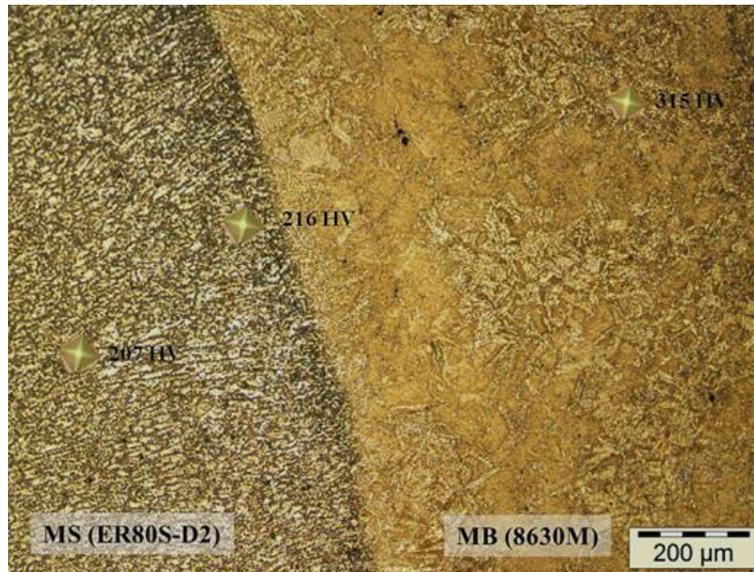
Região	Média [HV 0,10]	Desvio Padrão
MS (ER80S-D2)	208	5,9
ZAC	303	19,0
MB (8630M)	260	10,9

A observação que se faz ao aumento da microdureza na região da ZAC sem tratamento térmico de alívio de tensões, esta relacionada à microestrutura, modificada pelo processo de soldagem,

resultando, possivelmente, na formação do microconstituente martensita não revenida, elevando as tensões internas na região, o que pode favorecer a uma fragilização local do material.

Na Figura 7 é mostrada a variação da microdureza na região de interface do material amanteigado STTAT, com aumento de aproximadamente 100 HV_{0,1} entre as regiões do MS e MB (ZAC), justificada pelo maior teor de carbono do metal de base, além de ser uma região afetada termicamente e com características da presença de microconstituente de dureza mais elevada, como a martensita não revenida.

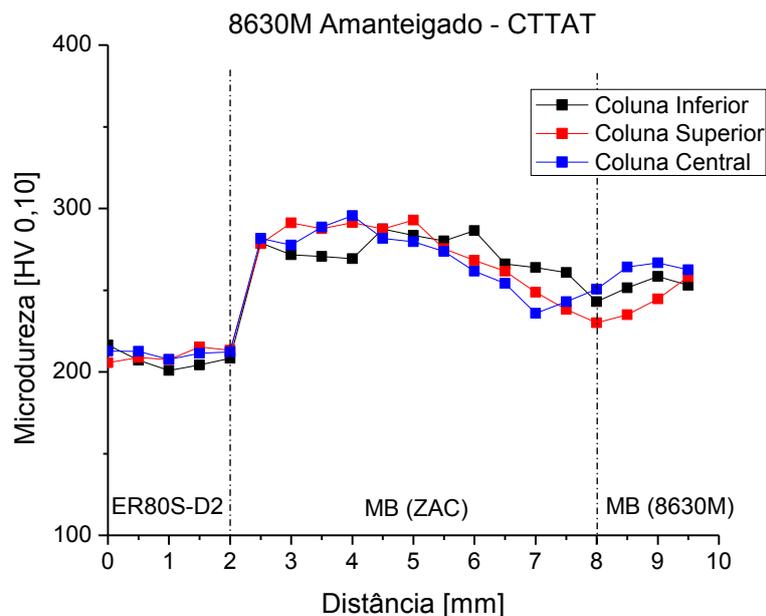
Figura 7 – Regiões de microdureza STTAT



Microdureza com tratamento térmico (8630M CTTAT)

Para os resultados da microdureza HV 0.10 do aço 8630M amanteigado CTTAT (com tratamento térmico de alívio de tensão), os valores obtidos no ensaio CTTAT, estão na Figura 8.

Figura 8. Perfil de microdureza no aço 8630M amanteigado – CTTAT.



Os valores obtidos, principalmente, apresentaram uma pequena redução na ZAC, atendendo aos requisitos da norma DNV RP B401. Observa-se uma melhor uniformidade nos resultados obtidos

do que STTAT, bem como um valor médio na ZAC de 275 HV 0,10. Essa redução da microdureza na ZAC esta relacionada ao microconstituente martensita revenida.

Na Tabela 3 verificam-se os valores médios para a condição CTTAT, com destaque para a redução da dureza na ZAC comparada ao material STTAT, apresentando uma redução média no valor de 10%, conforme a ação do tratamento térmico de alívio de tensões.

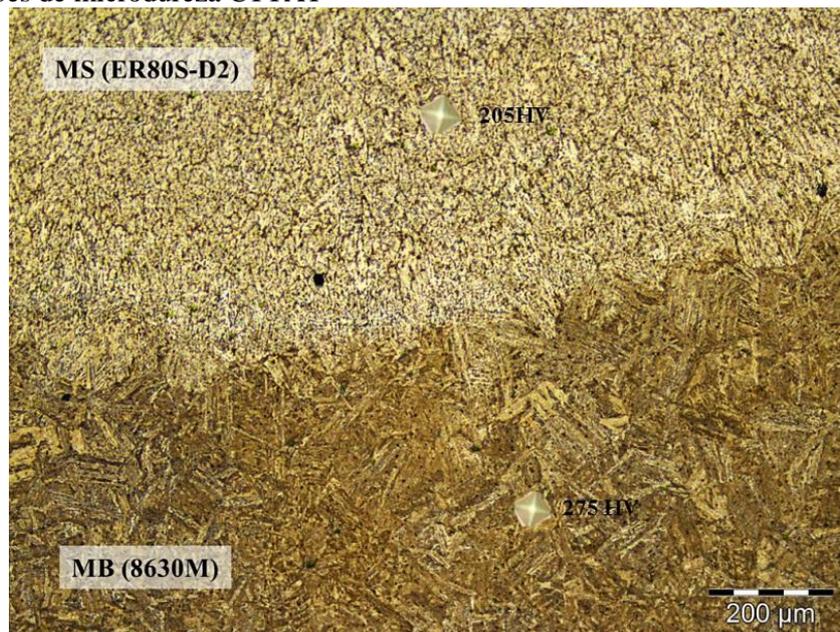
Tabela 3 – Médias das microdurezas do aço 8630M amanteigado - CTTAT

Região	Média [HV 0,10]	Desvio Padrão
MS (ER80S-D2)	210	4,3
ZAC	275	13,4
MB (8630M)	254	8,9

O limite da microdureza máxima de 350 HV, definida pela norma DNV RP B401 (2010), indica que acima deste valor, tem-se a presença de martensita que é frágil, principalmente sob ação do hidrogênio. Tal controle faz-se necessário no estudo, uma vez que é direcionado para a região da ZAC do amanteigamento do aço AISI 8630M.

O controle deste limite proporciona uma menor possibilidade de fragilização do material. Pode ser verificado na Figura 9 com a variação da microdureza entre o metal de solda e o metal de base (ZAC). OLIVEIRA (2013) E COSTA (2013) determinaram, em seus estudos, valores de microdureza no aço AISI 8630M amanteigado, cujos resultados foram próximos aos determinados no presente trabalho.

Figura 9. Regiões de microdureza CTTAT

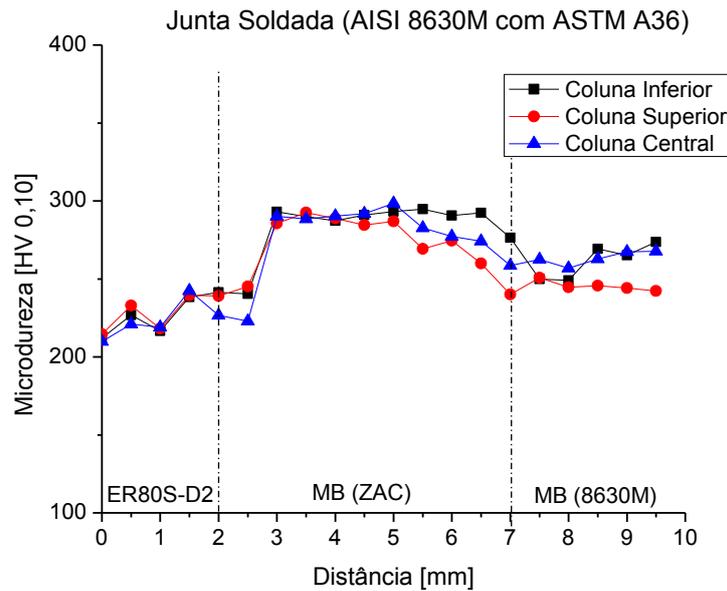


Microdureza da junta soldada (8630M com ASTM A-36)

Seguindo os mesmos procedimentos do material amanteigado CTTAT e STTAT, foram determinados para a junta soldada, os resultados da microdureza, visualizados na Figura 10.

A microdureza ao longo da junta soldada mostra um perfil similar ao material CTTAT, podendo-se verificar que o processo de soldagem entre os aços AISI 8630M e ASTM A-36 não alterou essa propriedade, mantendo-se, praticamente o mesmo comportamento da microdureza.

Figura 10. Perfil de microdureza da junta soldada

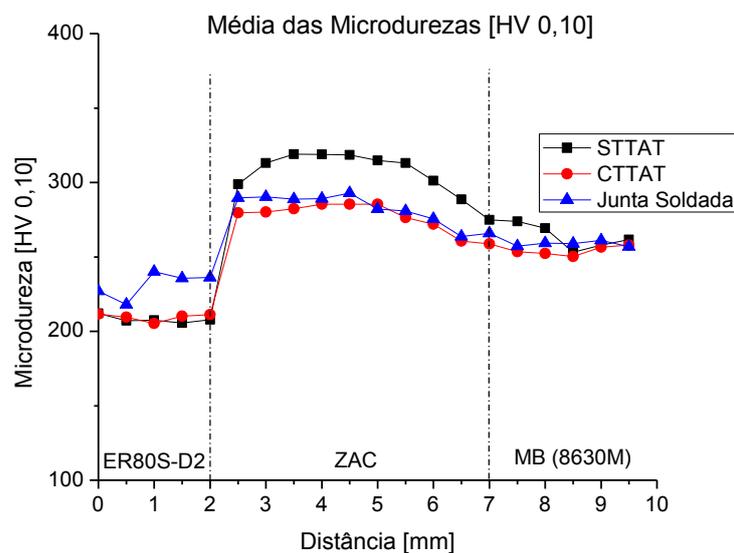


Mostra-se na Tabela 4 a avaliação média da microdureza da junta soldada, não apresentando variações relevantes após a soldagem.

Tabela 4. Médias das microdurezas da junta soldada

Região	Média [HV 0,10]	Desvio Padrão
MS (ER80S-D2)	231	10,1
ZAC	280	14,5
MB (8630M)	259	11,9

Figura 11. Perfil de microdureza ao longo do material



Como efeito comparativo para as condições já mencionadas nas Figuras 6, 8 e 10, verifica-se, na Figura 11 a distribuição da microdureza: STTAT, CTTAT e junta soldada. Essa comparação comprova que após a soldagem entre os aços AISI 8630M e ASTM A36, o aporte térmico utilizado nesse processo, não influenciou a região da ZAC originada pelo processo de amanteigamento anterior, no entanto, diante destes resultados tem-se a necessidade de realizar o TTAT após o amanteigamento, conforme condições estudadas.

Dureza da junta soldada

Para os resultados do ensaio de dureza, o material foi avaliado nas condições do aço 8630M amanteigado sem e com tratamento térmico bem como a avaliação da junta soldada, conforme resultados nas Tabelas 5, 6 e 7 respectivamente. Todos os ensaios foram realizados com base nas normas API 6A e NACE MR0175, seguindo-se as recomendações exigidas para a avaliação de materiais soldados. Para a avaliação dos resultados obtidos na Tabela 4.5 e 6 onde se verifica a distribuição da dureza ao longo do material amanteigado (AISI 8630M com ER80S-D2) os valores de maior dureza são verificados na ZAC do amanteigamento (ZAC do Amanteigamento).

O valor encontrado sem o tratamento térmico de alívio de tensão (STTAT) é reduzido em aproximadamente 12%, em relação ao CTTAT, confirmando a influência do tratamento térmico proposto para o material amanteigado. O resultado para as demais regiões avaliadas, MB e MS, apresentaram-se, de certa forma, sem alterações consideradas e com valor de dureza na escala HRB, uma vez que durante os ensaios, não se conseguiu determinar a dureza na escala HRC nessas regiões. Como, o estudo proposto, esta direcionada para a região da ZAC, nossa avaliação será direcionada para tal região, e conforme os dados da Tabela 5 apresentam-se com maior dureza possibilitando uma maior possibilidade de fragilização.

Tabela 5. Dureza média transversal do aço 8630 amanteigado (API 6A)

Condição	1ª Camada (HRB)	2ª Camada (HRB)	ZAC (HRC)	MB (HRB)
STTAT	89,90	87,65	24,57	97,83
CTTAT	88,65	87,34	21,48	96,42

De forma similar a avaliação obtida na Tabela 5, a Tabela 6 demonstra os resultados obtidos para o material amanteigado com alteração na localização dos ensaios, conforme detalhamento na NACE MR0175. Dos resultados obtidos na Tabela 5, verifica-se uma redução de aproximadamente 7% no valor da dureza obtido na ZAC 1, resultando num valor médio de 22 HRC. Para as regiões do metal de base (MB) e do metal de solda (MS), não se observou grandes alterações após o tratamento térmico do material, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Dureza média longitudinal do aço 8630 amanteigado (NACE MR0175)

Condição	MS (HRB)	ZAC (HRC)	MB (HRB)
STTAT	89,64	23,86	97,54
CTTAT	87,04	22,00	95,16

Após a avaliação do material amanteigado, realizou-se a soldagem final, e com isso, foi avaliada a dureza ao longo de toda junta dissimilar, avaliando-se as variações apresentadas após o processo de soldagem final. Desta forma, seguiram-se as recomendações da norma NACE MR0175, obtendo-se os resultados da Tabela 7. Na ocasião, tem-se a adição do Inconel 625, bem como a formação de uma ZAC 2 originada pelo Inconel.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de dureza da junta soldada (NACE MR0175)

Medidas	Inconel (HRB)	ZAC 2 (HRB)	MS (HRB)	ZAC (HRC)	MB (HRB)
Média	91,74	89,78	86,58	22,74	97,7

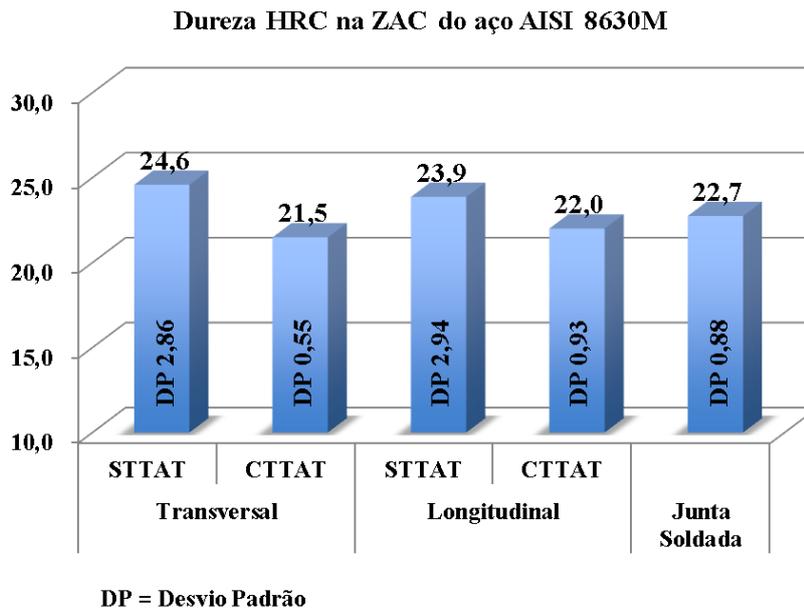
Os resultados obtidos na junta soldada, demonstram que a ZAC é a região de maior dureza na composição da junta. Na ocasião, observa-se uma média no valor da ZAC de 22,74 HRC, mantendo-se, com pequena elevação, o valor obtido pelo material antes da soldagem. Para a comparação das demais regiões avaliadas durante o amanteigamento, a avaliação é similar a já comentada, sem grandes alterações nos valores de dureza.

De acordo com a NACE MR0175 recomenda-se que o valor de dureza não deve ser superior a 22 HRC. Após o processo de soldagem o valor médio foi de aproximadamente 22,74 HRC com um desvio padrão de aproximadamente 0.93 HRC. No entanto, a norma ISO/FDIS 13628-4, comenta que

para alguns materiais que demonstraram susceptibilidade à fragilização por hidrogénio e quando expostos a protecção catódica em água do mar, o valor da dureza poderá ser limitado a 35 HRC, satisfazendo as condições encontradas.

A elevação da dureza em determinadas regiões de uma junta soldada, pode constituir uma desvantagem quando a aplicabilidade envolve o uso em estruturas marítimas, onde a dureza máxima recomendada pela norma NACE MR0175 é de 250 HV, visando evitar problemas de fratura frágil no material em serviço. De qualquer forma, os picos de dureza encontrados, principalmente na ZAC, podem ser minimizados ou evitados com o uso do preaquecimento, com o objetivo de reverter a martensita formada pelo cordão de solda anterior.

Figura 12. Dureza HRC das condições estudadas na ZAC do aço AISI 8630M



Na Figura 12, mostra-se um gráfico com a distribuição da dureza em escala HRC como efeito de visualização e acompanhamento da região da ZAC, observando que a junta soldada apresenta um comportamento similar ao material com tratamento térmico (CTTAT), evidenciando, da mesma forma que ocorreu na microdureza, a não influência do aporte térmico na ZAC de interesse. Com relação ao metal de solda (MS) e metal de base (MB) não se observou alterações para as condições avaliadas, tendo-se influência considerada, apenas, na ZAC.

CONCLUSÃO

No trabalho podemos concluir que a variação, com base no desvio padrão, para as condições de dureza da ZAC uma maior variação dos valores para as condições STTAT, apresentando valores mais uniformes após o TTAT bem como da junta soldada, o que reforça uma melhor homogeneização da microestrutura após o tratamento térmico.

Outra informação importante observada no estudo, diz respeito a não influência do aporte térmico do processo de soldagem final com o aço ASTM A-36, não alterando a zona termicamente afetada, ZAC, resultante do processo de amateigamento anterior a soldagem, assim, não foi observada, nenhuma alteração microestrutural no material bem como na dureza e microdureza da região avaliada da junta soldada. Desta forma, o amateigamento pode ser aplicado antes da soldagem final sem restrições quanto às alterações microestruturais no material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFERSA e UFPB, bem como ao CNPQ pelo apoio a pesquisa e ao CONFEA e CREA/RN pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- API 6A/ISO 10423:2004, Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment, Twentieth Edition, 2010.
- CAVALCANTE, F. J. N.; Influência do Hidrogênio na Tencidade Quase Estática de uma Junta Soldada Dissimilar Constituída de Aço AISI 8630M amanteigado com ER 80S-D2, Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, UFPB, 2014.
- COSTA, E. C.; Caracterização do aço 8630 modificado e amanteigado com Inconel 625 pelo processo de soldagem GMAW. Dissertação apresentada para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, 2013.
- ISO/FDIS 13628-4 – Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems — Part 4: Subsea wellhead and tree equipment, 2009.
- MARQUES, P. V., MODENESI, J. P., BRACARENSE, A. Q., Soldagem, Fundamentos e Tecnologia. Editora UFMG, 3ª edição, Belo Horizonte – MG, 2009.
- NACE MR0175/ISO 15156:2003 – Petroleum and Natural Gas Industries - Materials for use in H2S Environments in Oil and Gas Production – Part 2: Cracking Resistent Carbon and Low Alloy Steels and the use of Cast Iron. In.; 2003.
- OLIVEIRA, G. L. de; Soldagem dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas. Tese apresentada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia e Ciências dos Materiais da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2013.