



ESTUDO DA RESISTENCIA EM FADIGA DE CHAPAS AÇO SOLDADAS POR ELETRODO MARAGING TRATADAS TERMICAMENTE

Santos, R.C.S.;⁽¹⁾ Chaves, A.S.;⁽²⁾ Alves, R.S.;⁽³⁾ Bento, T.H.P.S.;⁽⁴⁾ de Abreu, H.F.G.;⁽⁵⁾
Nascimento, B. L.;⁽⁶⁾ Griza, S.⁽⁷⁾

1 - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais,
Universidade Federal de Sergipe (UFS). São Cristóvão, SE
renan_celestino@outlook.com

2 - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais,
Universidade Federal de Sergipe (UFS). São Cristóvão, SE
antelmoautomacao@yahoo.com.br

3 - Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.
robsantosalves@gmail.com

4 - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais,
Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.
thomazhenrique10@yahoo.com

5 - Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais,
Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE.
hamilton@metalmat.ufc.br

6 - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais,
Universidade Federal de Sergipe (UFS). São Cristóvão, SE
brenno.limanasc@gmail.com

7 - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais,
Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.
sandro.griza@gmail.com

Resumo

Este estudo investigou a resistência em fadiga de chapas de aço carbono soldadas com eletrodo maraging. Foram utilizados chapas de aço 1018 soldadas põe eletrodos maraging, em dois grupos distintos, onde metade das amostras foram submetidas a processo de recozimento térmico a 900°. Os dois grupos foram submetidos ao teste de fadiga a flexão em quatro pontos. Corpos de prova foram submetidos ao processo de corrosão sob tensão. Foi observado que o recozimento térmico reduziu resistência fadiga. Os resultados do processo de corrosão sob tensão mostraram que ambas as condições apresentaram pites. A zona de fusão apresentou pico de dureza, típico de soldas por eletrodo maraging, intensificado pelo recozimento. As demais regiões tiveram uma leve redução de dureza após o tratamento térmico.

Palavras chave: Soldagem, Fadiga, Maraging, Recozimento

1 - INTRODUÇÃO

Os aços Maraging são ligas formadas por quatro elementos (Fe, Ni, Co e Mo) e são conhecidos por sua alta resistência (1). Devido às elevadas concentrações de cobalto e níquel, o custo desses aços é elevado, o que restringe seu uso. Quando submetidos a tratamento térmico, os aços Maraging desenvolvem uma microestrutura martensítica que oferece uma combinação de alta ductilidade e boa conformabilidade. O nome "Maraging" é uma combinação das palavras "martensita" e "aging" (envelhecimento), referindo-se ao processo de tratamento que proporciona essas características. Essas propriedades, que podem parecer contraditórias à primeira vista, são viáveis devido ao baixo teor de carbono presente, cerca de 0,03%. Os aços Maraging são destacados por sua excelente resistência à fratura e limite de escoamento (2).

A soldagem de materiais dissimilares é amplamente utilizada em sistemas para exploração e produção de petróleo em águas profundas (3). Este processo geralmente envolve a união de tubos de aço de baixo carbono com aços forjados de baixa liga, que frequentemente são revestidos internamente com Inconel. Apesar de diversos estudos terem abordado o uso de eletrodos revestidos com base em Fe-Si-Mn, a maioria enfrenta o problema da perda de tenacidade no metal de solda. Atualmente, o uso de aço Maraging como cordão de solda tem se mostrado uma alternativa promissora, oferecendo uma combinação eficaz de alta tenacidade e resistência mecânica elevada (4).

Este estudo tem como objetivo comparar a vida em fadiga de chapas de aço AISI 1018 soldadas com eletrodos de aço Maraging em duas condições: como soldadas e recozidas.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo foram utilizados chapas de aço AISI 1018 (Figura 1) que foram submetidas ao processo de soldagem por eletrodos de aço Maraging.

Figura 1: Imagem da chapa utilizada nas análises.



Foram testados corpos de prova de comprimento médio de 243,6 mm, largura de 21,0 mm e espessura de 6,4 mm. Um grupo de corpos de prova foi submetido ao tratamento térmico por recozimento a uma temperatura de 900° C durante 2 horas, para alívio de tensões.

2.1- Ensaio de Fadiga

Os ensaios para a obtenção das curvas S-N de fadiga foram feitos em flexão de quatro pontos.

Para cada grupo de chapas, com e sem tratamento térmico, foram feitos 3 níveis de tensão correspondentes a percentuais da tensão de escoamento, que foi determinada a partir do ensaio estático de flexão de quatro pontos.

Os ensaios foram realizados em máquina servo-hidráulica MTS 370.10, seguindo as recomendações da norma ASTM E739, frequência de 30 Hz, razão de carregamento $R = 0,1$ e vãos dos suportes superiores e inferiores de 40 mm e 120 mm, respectivamente. O teste estático de flexão de quatro pontos foi realizado com velocidade 2,0 mm/min.

2.2- Corrosão sob tensão

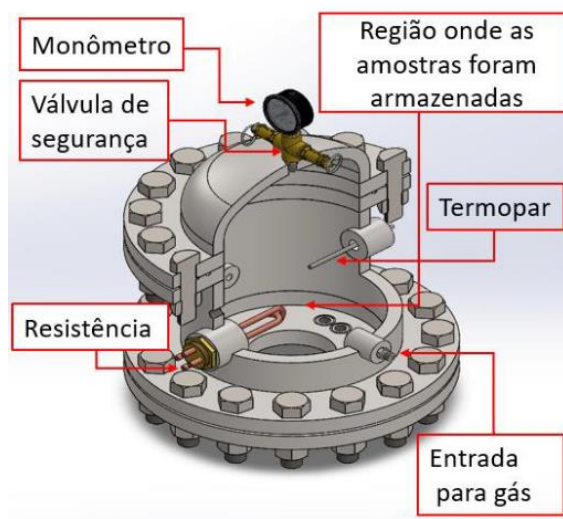
Dois corpos de prova rompidos para cada condição estudada, ambos apresentando deformação plástica e tensões residuais devido a flexão acima do escoamento, foram colocados na autoclave (Figura 2). Eles foram imersos em água do mar sintética (ASTM D1141) aquecida a 60 °C (± 2 °C), com a temperatura monitorada por um termopar de imersão. Esta temperatura é representativa da faixa operacional típica para elementos de produção *offshore* (BARROS, 2016).

Foi efetuada uma purga para substituir o ar atmosférico por uma atmosfera saturada de CO₂. Em seguida, a pressão de trabalho de 1 MPa (10 bar) de CO₂ foi aplicada utilizando uma válvula reguladora de pressão. O volume de água e a razão entre a área metálica exposta e o volume (V/A) foram mantidos em 1 ml/cm². O teste foi conduzido ao longo de três meses. A Figura 3 ilustra uma vista em corte da autoclave com os acessórios.

Figura 2: Autoclave para teste de corrosão sob tensão em operação.



Figura 3: Vista de seção da autoclave com acessórios.



2.3 - Microscopia Ótica

A análise metalográfica por microscopia ótica foi empregada para investigar o comportamento microestrutural das amostras, permitindo examinar o arranjo dos grãos após os procedimentos de fadiga e corrosão sob tensão. A preparação das amostras para análise micrográfica incluiu corte, embutimento em baquelite, lixamento e polimento. A análise foi realizada utilizando microscópio ótico Leica DM 2500M. As amostras foram lixadas com abrasivos de granulometria progressiva, começando com #80 e indo até #1200, seguidas de polimento mecânico com pasta de diamante. O ataque químico foi realizado com Nital 2% (2 ml de ácido nítrico e 98 ml de álcool) para a região do metal base e água régia (3:1 ácido clorídrico e ácido nítrico) para o cordão de solda. As medições de microdureza foram realizadas utilizando o método

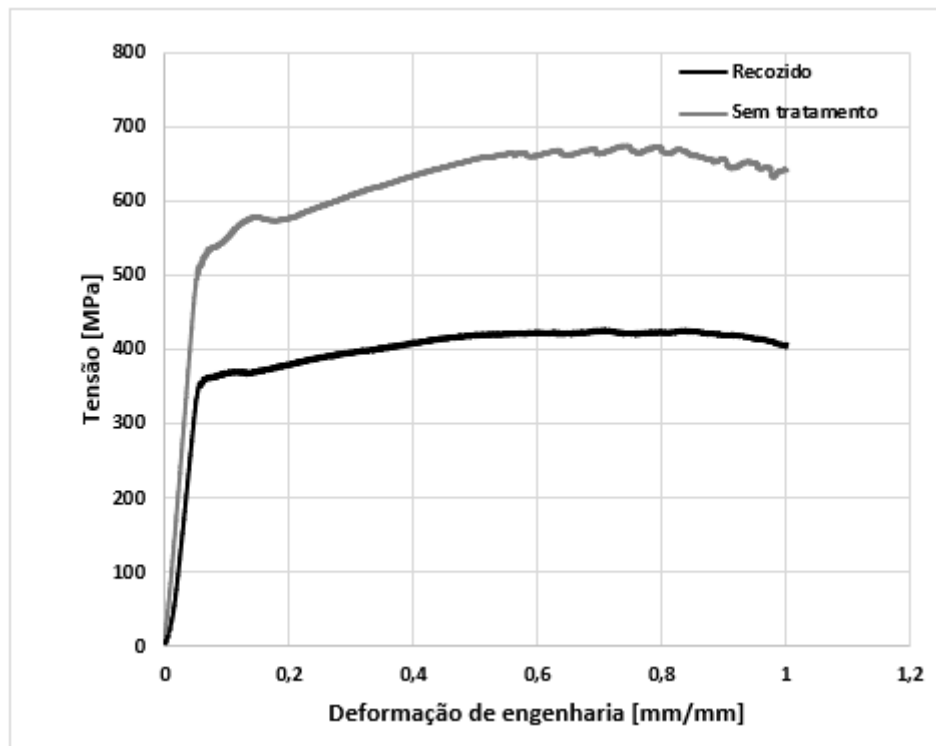
Vickers, através do microdurômetro (HVS-1000A). A análise de composição química foi realizada através de cinco queimas no núcleo da peça, utilizando um espectrômetro de emissão óptica (Oxford Foundry Master Xpert).

3- RESULTADOS

3.1- Fadiga

As curvas tensão x deformação do ensaio estático de flexão de quatro pontos pode ser vista na Figura 4. Foi encontrada uma tensão de escoamento de 500 MPa para deformação de 0,2% para as chapas de aço sem tratamento térmico. Para as chapas de aço tratadas termicamente foi encontrada uma tensão de escoamento de 340 MPa para deformação de 0,2%.

Figura 4: Curva de fadiga (SN) para as chapas soldadas com eletrodo maraging.



Os resultados dos ensaios de fadiga nas chapas sem tratamento térmico comum podem ser visualizados na Figura 5 e Tabela 1.

Figura 5: Curva de fadiga (SN) para as chapas soldadas com eletrodo maraging.

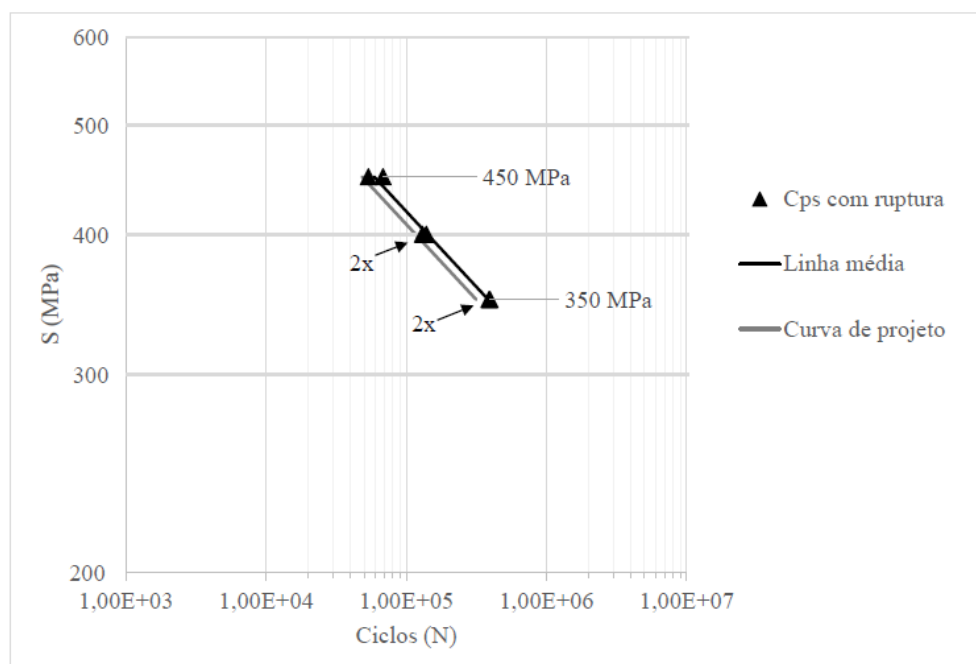


Tabela 2: Resultado dos ensaios de fadiga das chapas soldadas com eletrodo maraging.

Identificação do CP	% da tensão de escoamento	Tensão (MPa)	Número de ciclos
MARANGING_CP1	90	450	53556
MARANGING_CP2	90	450	68137
MARANGING_CP3	80	400	138924
MARANGING_CP4	80	400	130329
MARANGING_CP5	70	350	395022
MARANGING_CP6	70	350	388731

Os corpos de prova sem tratamento térmico apresentaram os resultados de fadiga de acordo com as seguintes relações: linha média: $\log N = 24,54275 - 7,45257 \log S$, Curva de projeto: $\log N = 24,54275 - 7,45257 \log S - 2\delta$. Onde N é o número de ciclos, S é a tensão máxima cíclica em MPa e δ é o desvio padrão igual a 0,04274.

O objetivo do recozimento térmico, foi eliminar possíveis tensões residuais presentes na estrutura do material, tensões estas oriundas do processo de soldagem, que poderiam influenciar na resistência mecânica do material. Os resultados dos ensaios de fadiga nas chapas tratadas termicamente podem ser visualizados na Figura 6 e na Tabela 2.

Figura 6: Curva de fadiga (SN) para as chapas submetida ao tratamento térmico.

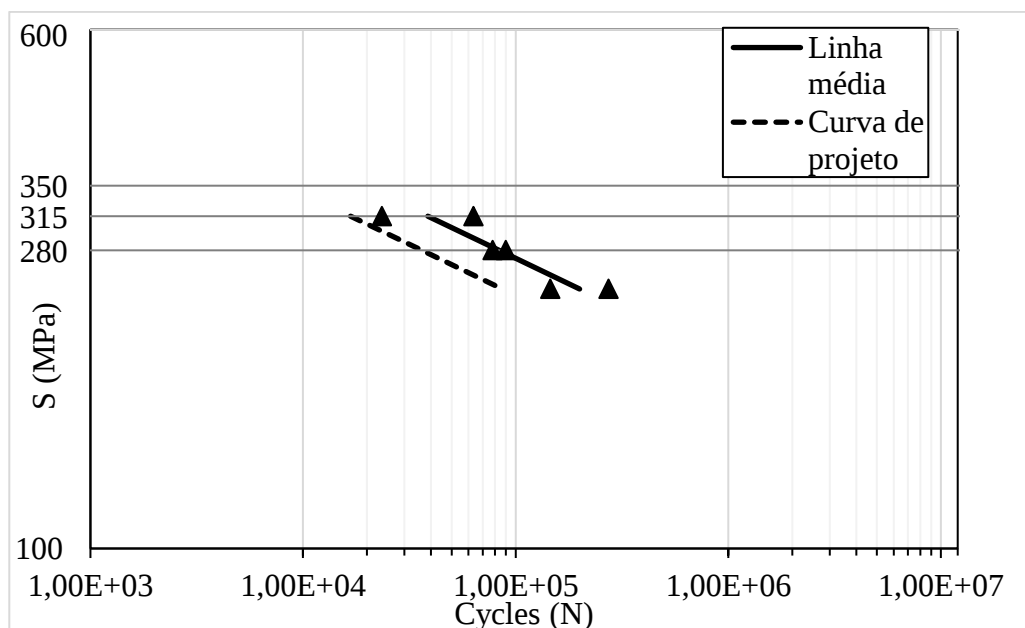


Tabela 2: Resultado dos ensaios de fadiga das chapas submetidas ao tratamento térmico.

Identificação do CP	% da tensão de escoamento	Tensão (MPa)	Número de ciclos
MARANGING_01	90	315	63347
MARANGING_02	90	315	23471
MARANGING_03	80	280	89839
MARANGING_04	80	280	78099
MARANGING_05	70	245	273170
MARANGING_06	70	245	145722

Os corpos de prova sem tratamento térmico apresentaram os resultados de fadiga de acordo com as seguintes relações: linha média: $\log N = 23,3261 - 7,36616 \log S$, Curva de projeto: $\log N = 23,3261 - 77,36616 \log S - 2\delta$. Onde N é o número de ciclos, S é a tensão máxima cíclica em MPa e δ é o desvio padrão igual a 0,8116956.

Ao analisar as curvas de fadiga (linha média), observamos que as chapas sem tratamento térmico resistiram a um maior número de ciclos em comparação com as chapas recozidas, indicando uma superior resistência à fadiga. No entanto, a linha de projeto, que representa o desvio padrão das chapas submetidos ao tratamento térmico, mostrou-se mais afastada da linha média, resultando em um desvio padrão mais alto. Isso sugere que a vida útil em fadiga pode variar significativamente entre

diferentes corpos de prova, dependendo dos níveis de tensão. Esse elevado desvio padrão pode estar relacionado a fatores críticos que afetam a resistência do material, como defeitos na superfície das amostras e possíveis variações na uniformidade do cordão de solda.

Os aspectos morfológicos da fratura das chapas de aço submetidas ao teste de fadiga podem ser vistos nas Figuras 7 e 8. Em ambas situações estudadas, a fratura ocorreu na zona termicamente afetada (ZTA).

Figura 7: Aspecto morfológico da trinca da chapa com eletrodo maranging testado em fadiga.



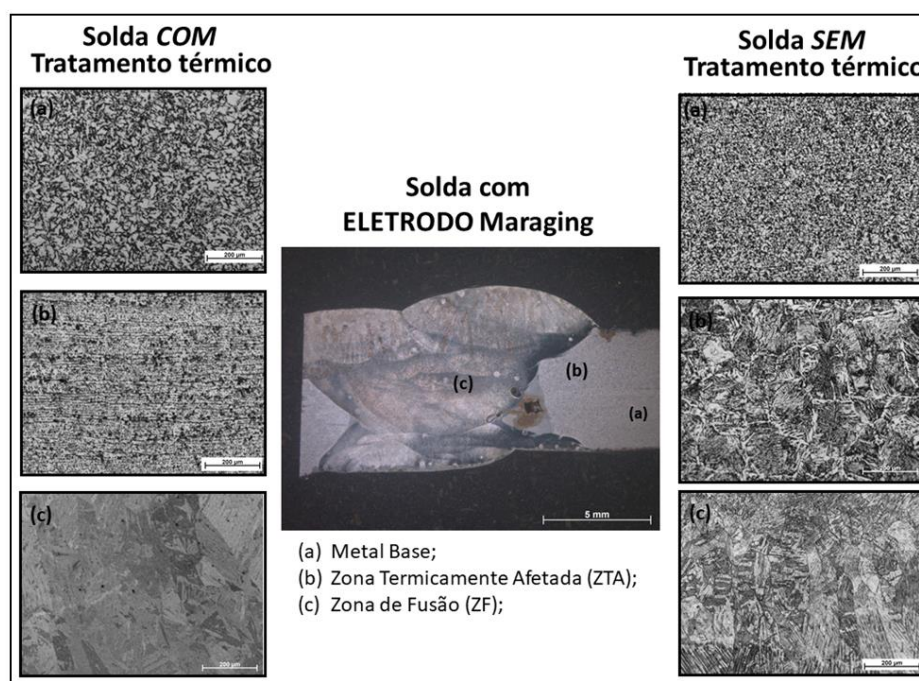
Figura 8: Aspecto morfológico da trinca da chapa com eletrodo maranging testado em fadiga.



3.2 – Análise microestrutural

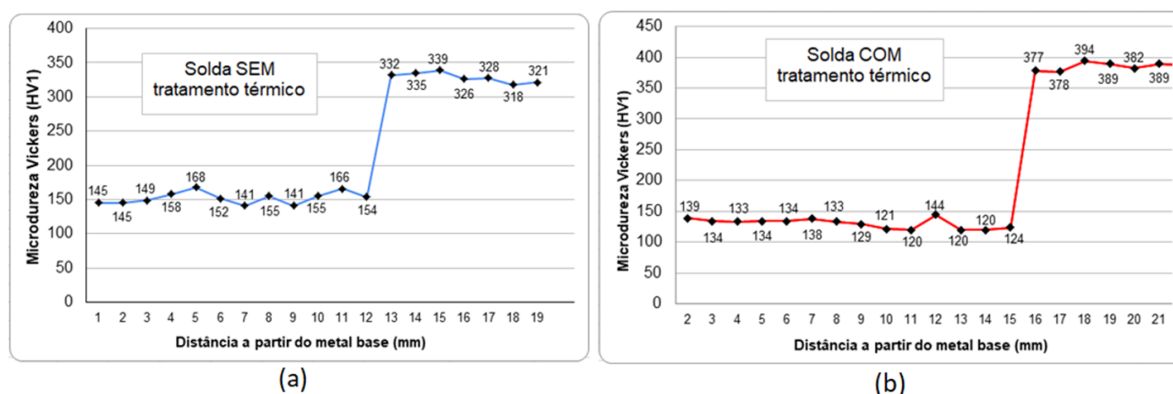
Pode ser observado que o metal base, área ao redor da solda que não sofre alteração da solda, teve sua estrutura original preservada tanto para a chapa sem tratamento quanto para a chapa submetida ao recozimento (Figura 1 região A), tanto na microestrutura quanto nos níveis de microdureza. A microdureza, no entanto, sofreu leve diminuição após tratamento térmico posterior de recozimento (Figura 10).

Figura 9: Solda com eletrodo maraging: metalografia das microestruturas na região da solda, comparando as condições com e sem tratamento térmico.



A zona termicamente afetada (ZTA), região do metal base que é aquecida pelo processo de soldagem, mas que não chega a fundir, apresentou mudanças significativas após o tratamento térmico. Observamos que o aquecimento da solda inicialmente resultou na formação de grãos grosseiros recristalizados (Figura 1, região B). No entanto, com o tratamento térmico de recozimento, houve refinamento desses grãos, levando à formação de uma microestrutura mais homogênea. Essa transformação resultou em uma leve redução da microdureza na ZTA em comparação com o estado sem tratamento (Figura 2, a e b), favorecendo maior tenacidade.

Figura 10: Microdureza na região da solda com eletrodo maraging: (a) microdureza sem tratamento térmico, (b) microdureza após tratamento térmico de recozimento.



Já a zona de fusão (Figura 9, C), região onde o metal base e o metal de adição (ou eletrodo) são fundidos durante o processo de soldagem. Podemos observar a

formação de martensita com linhas de contorno de grão bem definidas e orientadas que se formaram durante a solidificação do metal fundido. Foi observado também um pico de microdureza característico de soldas com eletrodo maraging, onde a dureza aumentou significativamente de uma média de 130 HV no metal base, para uma dureza próxima a 400 HV. Após o tratamento térmico, a dureza nessa região apresentou mais um leve aumento adicional (Figura 10, A e B).

3.3 – Corrosão sob tensão

A Figura 11 e a Figura 12 apresentam respectivamente as micrografias das chapas soldadas por eletrodo maraging sem tratamento e com tratamento térmico após a exposição dos corpos de prova à corrosão sob tensão. Observa-se em ambos, que o processo corrosivo causou pites, (indicado pelas setas brancas) que podem atuar como concentradores de tensão, aumentando a suscetibilidade ao aparecimento de trincas. No entanto, não foram detectadas trincas de corrosão sob tensão.

A presença de pites é evidente tanto no metal base (Figura A), quanto na zona termicamente afetada (Figura B) e no cordão de solda (Figura C), para as duas condições estudadas, indicando a suscetibilidade ao desenvolvimento de pites nestas regiões.

Figura 11: Análise de pites sobre a estrutura do material sem tratamento térmico submetido ao processo de corrosão sob tensão.

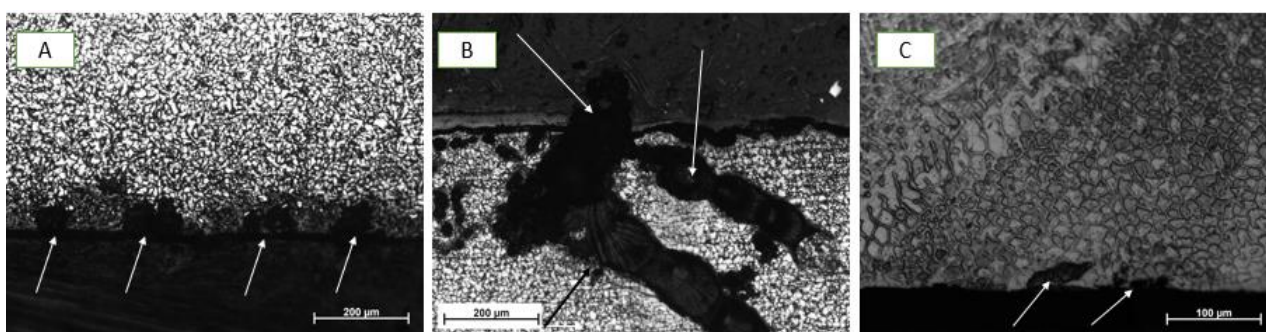
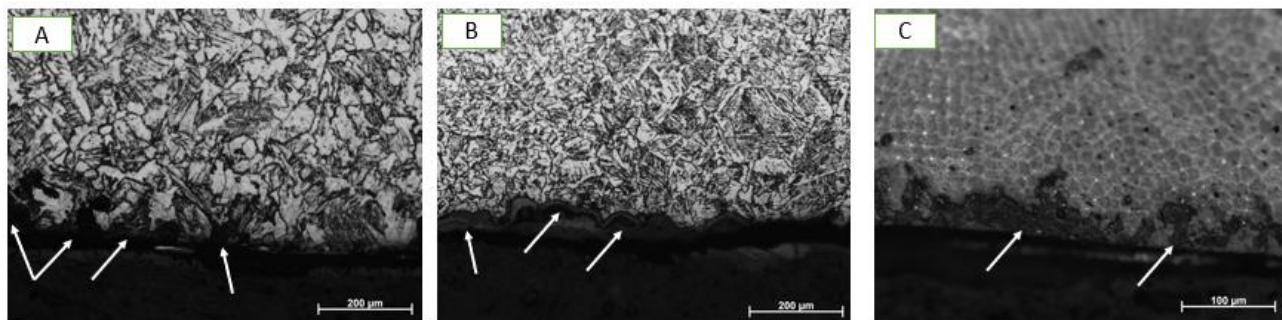


Figura 12: Análise de pites do material tratado termicamente após o processo de corrosão sob tensão.



4 - CONCLUSÕES

O estudo comparativo entre chapas de aço soldadas com eletrodo maraging, com e sem recozimento, mostrou que o recozimento diminuiu a resistência em fadiga. O teste de corrosão sob tensão revelou a suscetibilidade do material sofrer corrosão por pites nas condições do teste, visto que foi possível encontrar a presença de pites em todas as regiões da solda nas amostras.

A zona de fusão da solda apresentou aumento considerável de dureza após a soldagem em comparação as demais regiões, comportamento característico de soldas com eletrodo maraging. Após o tratamento térmico de recozimento, a dureza nessa região sofreu leve aumento. Em contraste, as demais regiões da solda mostraram ligeira redução na dureza após o recozimento.

Agradecimentos

As agências financiadoras das bolsas dos alunos, CAPES e CNPq.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PARDAL, J. M.; TAVARES, S. S. M.; FONSECA, M. P. C.; ABREU, H. F. G.; SILVA, J. J. M. Study of the austenite quantification by X-ray diffraction in the 18NiCo-Mo-Ti maraging steel. *Journal of Materials Science*, 2006 v. 41, p. 2301-2307.
- [2] SINHA, P. P.; SREEKUMAR, K.; NATARAJAN, A.; NAGARAJAN, K. V. Grain growth in 18Ni 1800 MPa maraging steel. *Journal of Materials Science*, 1991 v.26, p. 4155 – 4159.
- [3] JOHNSON, W. C.; STEIN, D. F. A study of grain boundary segregants in thermally embrittled maraging steel. *Metallurgical Transactions*, 1974 v. 5, p. 549 – 554.
- [4] Barrio, Regina Coeli Araújo Vieira Gunyics; Muniz, Letícia Rabelo; Mata, Stephany Aparecida Santos da; Silva, Marcelo José Gomes da; Abreu, Hamilton Ferreira Gomes de. EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES DE UM AÇO MARAGING 300, p. 2615-2624. In: *74º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 2019.