

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AUTORREPARO POR PULSOS ELÉTRICOS DA LIGA AA5083 (AL-MG) APLICADA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA OFFSHORE DO PETRÓLEO

AUTORES:

Maria Monique de Brito Leite, Erijanio Nonato Silva, Sergio Rodrigues Barra, Mauricio Mhirdauí Peres e Rubens Maribondo do Nascimento

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AUTORREPARO POR PULSOS ELÉTRICOS DA LIGA AA5083 (AL-MG) APLICADA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA OFFSHORE DO PETRÓLEO

Resumo

Neste trabalho, chapas da liga comercial AA5083 (Al-Mg) com espessura de 5mm foram submetidas a procedimento de geração de defeitos microestruturais, via ensaio de tração interrompido, com posterior procedimento de aplicação de pulsos elétricos para a promoção de mecanismo de autorreparo. Usualmente aplicada em componentes estruturais na indústria Offshore de Petróleo e Gás, essa liga é submetida a diversos tipos de fenômenos de degradação que resultam em danos microestruturais. A redução desses defeitos, com alívio de tensões, redução do encruamento, redução de tamanho de microcavidades ou microtrincas, podem ser promovidos por técnicas de autorreparo. Uma técnica pouco estudada, porém, que se mostra promissora, é através da aplicação de pulsos elétricos no material, que aumenta a mobilidade atômica atuando nos defeitos promovendo a recuperação parcial da ductilidade e assim aumento da vida útil do componente. Uma fonte gera a corrente elétrica que passa pelo material conectado a eletrodos presos nas suas extremidades. O fluxo de elétrons deve ser suficientemente alto para promover a ativação de mecanismos atômicos de aceleração difusional, que podem promover a movimentação de discordâncias e a redução de microdefeitos. Para aplicação dessa técnica, foram preparados corpos de provas da liga AA5083- H112, adaptados da norma ASTM-E8/E8M-20, com largura de 3mm e espessura de 5mm de secção transversal, que foram submetidos ao ensaio de tração com velocidade de ensaio de 1mm/min. As amostras no estado de origem apresentaram resistência à tração média de 218,14N/mm² e deformação total de 17,2%. Novas amostras foram tracionadas até 80% da deformação de ruptura, tendo sua microestrutura observada via MEV-FEG, apresentando defeitos microestruturais como alongamento de grãos e microcavidades promovidas pela deformação. A partir desse estado, as amostras foram submetidas ao procedimento de pulsos elétricos fornecido por uma fonte de soldagem Digiplus A7 600 com uma adaptação do circuito passante pela amostra conectada entre a mesa e o cabo terra. As densidades de corrente impostas, proporcionais à menor seção transversal de cada amostra, envolvem correntes de pico e de base, período e número de ciclos, foram comparados com dados da literatura. Os parâmetros da literatura são divergentes e mostram estudos para densidade acima de 60 A/mm², enquanto os resultados do presente trabalho mostraram efetividade do autorreparo com densidade de corrente inferior (com elevação da temperatura de apenas 5°C), mostrando uma clara melhoria da tensão de escoamento e da ductilidade em ensaios de tração. A análise microestrutural via MEV-FEG e DRX nas amostras deformadas antes e após os procedimentos de eletropulso mostram resultados complementares ao entendimento do mecanismo de autorreparo envolvido.

Palavras-chave: liga de alumínio, autorreparo, pulsos elétricos, caracterização.

Abstract

In this work, sheets of commercial alloy AA5083 (Al-Mg) with a thickness of 5 mm were subjected to a procedure for generating microstructural defects, via an interrupted tensile test, with a subsequent procedure of application of electrical pulses to promote a self-repair mechanism. Usually applied to structural components in the Offshore Oil and Gas industry, this alloy is subjected to several types of degradation phenomena that result in microstructural damage. The reduction of these defects, with stress relief, reduction of hardening, reduction of the size of microcavities or microcracks, can be promoted by self-repair techniques. A little studied technique, however, which shows promise, is

through the application of electrical pulses in the material, which increases the atomic mobility, acting on the defects, promoting the partial recovery of ductility and thus increasing the component's useful life. A source generates the electric current that passes through the material connected to electrodes attached to its ends. The electron flux must be high enough to promote the activation of atomic mechanisms of diffusional acceleration, which can promote dislocation movement and microdefect reduction. For the application of this technique, specimens of AA5083-H112 alloy were prepared, adapted from the ASTM-E8/E8M-20 standard, with a width of 3mm and a thickness of 5mm in cross section, which were subjected to the tensile test with test speed of 1mm/min. The samples in the original state showed an average tensile strength of 218.14N/mm² and a total deformation of 17.2%. New samples were pulled up to 80% of the rupture strain, and their microstructure was observed via SEM-FEG, showing microstructural defects such as grain elongation and microcavities promoted by the strain. From this state, the samples were submitted to the electrical pulse procedure provided by a Digiplus A7 600 power source with an adaptation of the circuit passing through the sample connected between the table and the ground cable. The imposed current densities, proportional to the smallest cross section of each sample, involving peak and base currents, period and number of cycles, were compared with data from the literature. The parameters in the literature are divergent and show studies for density above 60 A/mm², while the results of the present work showed the effectiveness of self-repair with lower current density (with a temperature rise of only 5°C), showing a clear improvement in the voltage of yield and ductility in tensile tests. The microstructural analysis via SEM-FEG and XRD in deformed samples before and after electropulse procedures show complementary results to the understanding of the self-repair mechanism involved.

Keywords: aluminum alloy, self-repair, electrical pulses, characterization.

Introdução

Nos últimos anos tem-se observado um intenso interesse no setor offshore da indústria do petróleo, impulsionado pela exploração em alto mar. Neste panorama, os metais estruturais estão sujeitos ao desgaste, fadiga, fluência e condições ambientais promovidos pelas ondas marítimas, ventos, salinidade do mar, hidrocarbonetos e gases como H₂S e CO₂ (Kilicli et al., 2018; Canepa et al., 2018). Como resultado, ocorrem solicitações extremas de elevados esforços mecânicos e iminente atuação de mecanismos corrosivos sobre os componentes estruturais metálicos (Canepa et al., 2018; Gelfgat et al., 2019). Essas problemáticas estão associadas as propriedades intrínsecas dos metais à alta susceptibilidade aos fenômenos de degradação, podendo haver nucleação e propagação de defeitos microestruturais. Os defeitos microestruturais podem reduzir consideravelmente a performance mecânica e limitam a vida-útil desses materiais resultando, por vezes, em falhas catastróficas (Ngoc, 2016; Gelfgat et al., 2019).

Dentre os principais metais utilizados nessa indústria estão os aços (Bott et al., 2005), que apesar das suas propriedades mecânicas apreciáveis para solicitações de esforços, ao ser comparado com outros metais sua resistência à corrosão não é tão atraente. Outra opção para essas aplicações são as *ligas de alumínio estruturais* (LAE) das séries 5xxx e 6xxx, que promovem uma vantagem significativa na relação *resistência / peso* e intensifica o rendimento por meio da ampliação da vida-útil e segurança da estrutura (Ngoc, 2016; Fageehi and Saminathan, 2020).

As ligas da série 5xxx são ligas de Al-Mg, onde na indústria petrolífera e naval, o teor apreciável de Mg está entre 3 e 5% em massa, além da presença de alguns elementos formadores de dispersóides,

como o cromo, o manganês e o titânio, de 0,25% a 1% em massa. Nas aplicações mais comuns, essas ligas são solicitadas por diversos esforços mecânicos, como tensões tratativas, compressivas, torcionais, flexivas e fadiga, que promove a geração de defeitos microestruturais ao longo de sua vida útil, como o encruamento, formação de microcavidades, trincas e a fratura (Canepa et al., 2018; Ngoc, 2016; Fageehi and Saminathan, 2020; Gelfgat et al., 2019). Diante disso, os mecanismos de autorreparo são empregados para prevenir e reparar esses defeitos, como os microvazios e as microtrincas, antes que a fratura ocorra. Dentre os principais mecanismos de autorreparo, algumas técnicas são consideradas inviáveis devido a implementação em escala realista (Zhang et al., 2020; Ferguson, 2014). Como alternativa a técnica pela emissão de pulsos elétricos vem se mostrando satisfatória e é relatada algumas pesquisas (Conrad, 2000; Jung et al., 2017; Zheng et al., 2014; Wu et al., 2014).

Em geral, como descrito por Conrad (2000), ao serem aplicados pulsos elétricos em materiais metálicos é possível promover o estímulo para os fenômenos de aceleração da difusão atômica, da movimentação das discordâncias e/ou diminuição na barreira de energia de transformação de fase que, observado por Xu et al. (2007), favorecem na promoção dos mecanismos de nucleação e recristalização. Assim, quando os pulsos elétricos são emitidos sob um metal a difusão atômica tende a ser acelerada, o que favorece os mecanismos de movimentação de discordâncias e, como observado por Xu et al. (2007), há a promoção dos mecanismos de recristalização. Por conta disso o estudo abrange também a eletroplasticidade provocada por esse mecanismo na microestrutura dos metais.

No estudo realizado pelos pesquisadores J. Jung et al. (2017), a influência do efeito de pulsos elétricos na reparação de trincas de amostras de alumínio da série AA6061 com espessura de 4,5 mm foi avaliada. Para isso o ensaio de fadiga foi regido de forma que se definia a tensão necessária para as amostras alcançar 100% da vida-útil, sendo essa tensão de 160 MPa, em seguida realizou-se o ensaio até uma tensão de 140 MPa, equivalente a 70 % da vida-útil, para inserir defeitos que pudessem ser reparados por pulsos elétricos. Com auxílio de um transistor-type power source (Miyachi MDA-8000B), densidades de correntes de 60 A/mm² até 150 A/mm² com duração de pulsos de 0,5 ms foram aplicadas nas amostras. Por meio de imagens de MEV foram observadas fusões locais nas zonas iniciais das trincas devido ao efeito Joule provocado pela concentração de densidade de corrente. Observou também que os valores de corrente que mais favoreceram o retardamento das trincas foram entre 60 A/mm² e 90 A/mm², enquanto que, defeitos como pequenos dimples surgiram nas amostras submetidas a 150 A/mm². Acredita-se que em densidades de corrente excessivamente altas, o crescimento das trincas é estimulado. Em resumo neste estudo a vida a fadiga dos materiais tratados com pulsos elétricos de 60 A/mm², 90 A/mm² e 120 A/mm² foram aumentadas em 24 %, 55 % e 38 %, respectivamente, e para amostras submetidas a 150A/mm², a vida à fadiga diminui em 10 %.

W. Wu et al. (2014) investigaram o efeito do eletropulso em precipitados metaestáveis e na resistência mecânica da liga AA2024. Neste estudo é abordado o mecanismo de retrocesso microestrutural da liga AA2024 para ser atingida uma microestrutura com maior trabalhabilidade. O resultado do estudo verificou que ao comparar com o tratamento tradicional de retrocesso (RHT), as amostras eletropulsadas conseguiram se restaurar mais rapidamente em temperatura ambiente com pulsos de 160 A/mm² por 0.5 s. Constatando-se que densidades de correntes mais altas com mais pulsos elétricos alcançam mais eficientemente o efeito de retrocesso microestrutural. Assim, foi possível diminuir o consumo de energia e aumentar a eficiência na produção desse material.

Assim, este trabalho visa obter informações experimentais mais detalhadas e específicas da correlação entre *densidade de corrente versus número de ciclos versus intervalo de aplicação versus reparo microestrutural* da técnica de pulsos elétricos sobre a microestrutura e propriedades mecânicas das ligas de alumínio da série 5083.

Metodologia

O material de partida foi uma chapa comercial da liga AA5083 - H112 (Al-3,4Mg-0,65Mn-0,16Si) com espessura de 5,0 mm. Os corpos de prova foram elaborados com o auxílio do software *Autodesk Fusion 360°* com uma adaptação da norma ASTM-E8/E8M-20, resultando em uma seção transversal de 3mm de largura com 5 mm de espessura.

Em seguida, no Laboratório de Manufatura (LABMAN) da UFRN, os materiais foram usinados em uma fresadora alemã da marca *Heckert* tipo *FW*, observados na Figura 1. Como resultado foram elaborados 30 corpos de provas.

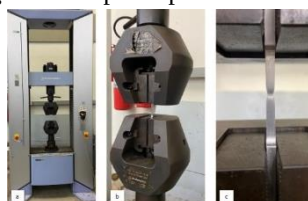
Figura 1 – Usinagem dos (a) corpos de prova da liga AA5083, (b) perspectiva ampliada e (c) resultado final.



Fonte: Autora, 2022.

Os ensaios de tração foram feitos por uma máquina universal Shimadzu, modelo AG-X 300 kN, com célula de carga de 300 kN, no Laboratório de Ensaios Mecânicos dos Materiais da UFRN (Figura 3). Os corpos de prova foram submetidos à tração com velocidade da travessa de 1mm/min, nas seguintes condições: (1) deformação até a ruptura; (2) deformação parcial de 80% da E_{rupt} ; (3) aplicação de pulsos elétricos nas amostras sem deformação e nas amostras com 80% pré-deformadas; (4) ensaios de tração nas amostras que receberam pulsos elétricos; (5) comparação das propriedades mecânicas e das microestruturas.

Figura 2 – (a) Máquina de ensaio de tração, (b) vista semi-lateral do corpo de prova antes do ensaio; e (c) detalhe da estrição no corpo de prova durante o ensaio.



Fonte: Autora, 2022.

Os corpos de prova (cp) foram submetidos ao procedimento de pulsos elétricos no Laboratório de Soldagem e Inspeção da UFRN com uma fonte de soldagem Digiplus A7 600 (Figura 3) com uma adaptação do circuito passante pela amostra conectada entre a mesa e o cabo terra do modo TIG pulsado.

Figura 3 – (a) Máquina de soldagem Digiplus A7 600, (b) vista frontal do cp, (c) vista lateral do cp e (d) vista lateral ampliada do cp.



Fonte: Autora, 2022

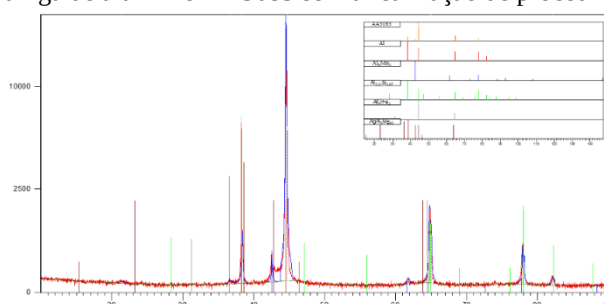
As amostras foram caracterizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da UFRN via Difractometria de Raios-X (DRX) em um equipamento Shimadzu XRD-7000 com velocidade de 1°/min na faixa angular (2θ) de 10° a 90°. Imagens de microscopia foram obtidas em um equipamento MEV-FEG Auriga com analisador de EDS.

Resultados e Discussão

A liga AA5083 usada apresentou teor médio de magnésio de 3,45 % em peso, após análise de EDS, estando um pouco abaixo do valor nominal (entre 4,0 e 4,9 %). O Mg em solução sólida e em particulados de segunda fase influencia diretamente na densidade de discordâncias submetidas a deformações plásticas que provoca aumento na energia interna do sistema e consequentemente, atua como força motriz para os processos recuperação e recristalização. O Mg tende a migrar e segregar ao redor das discordâncias causando distorções na rede e reduzindo a energia de falha de empilhamento, devido a isso há restrição da mobilidade das discordâncias promovendo o fenômeno de encruamento.

A realização da técnica de DRX (Gráfico 1) corroborou para identificação da presença das fases Al_8Mn_5 , $\text{Al}_{3,21}\text{Si}_{0,47}$, AlCrFe_2 e $\text{AgAl}_6\text{Mg}_{42}$. A observância dessas fases possibilitou a explicação para fundamentar o entendimento dos fenômenos de amaciamento e endurecimento simultâneos observados nos gráficos de tensão-deformação. Isto porque à medida que o material foi tracionado a movimentação das discordâncias foi dificultada pela presença dessas fases, no entanto, conforme a força trativa aumentava as discordâncias conseguiram ultrapassar esses obstáculos e voltar a se movimentar com maior liberdade.

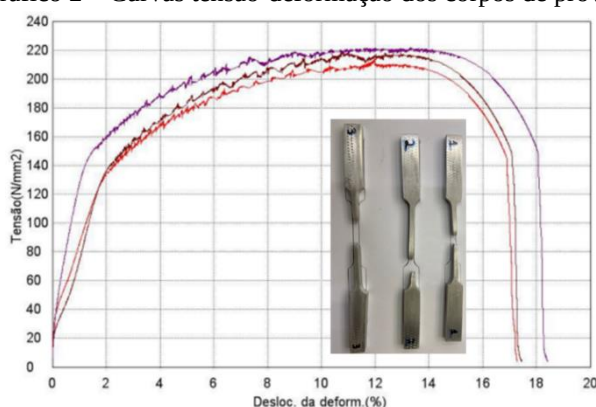
Gráfico 1 – DRX da liga de alumínio AA5083 sem a realização de procedimento experimentais.



Fonte: Autora, 2022

O Gráfico 2 mostra o comportamento sobre tração de três amostras originais, sendo obtidos valores médios de tensão e deformação. Verifica-se um comportamento distinto no regime de deformação plástica através de uma tensão variante do tipo serrilhado. Este fenômeno pode estar relacionado à mecanismos de endurecimento e de amaciamento simultâneos intrínsecos do sistema Al-Mg, com o Mg atuando como soluto na solução sólida da fase Al-alfa (CFC). A tensão máxima média foi de $218,14\text{N/mm}^2$, com desvio padrão de $3,045\text{ MPa}$, e deformação total de 17,2%.

Gráfico 2 – Curvas tensão-deformação dos corpos de provas 1, 2 e 3.

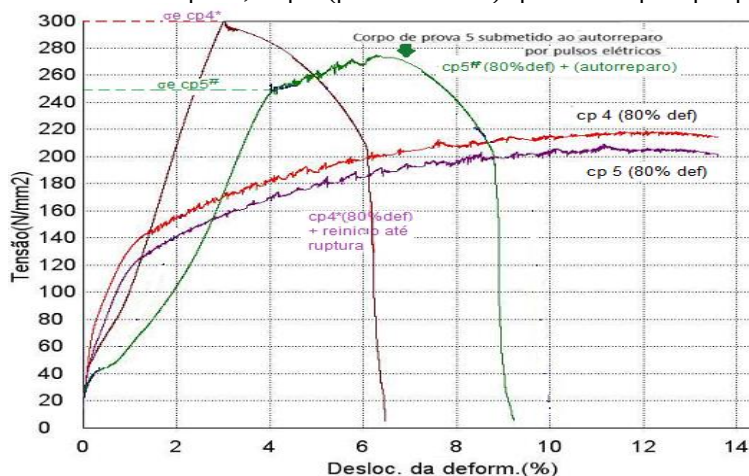


Fonte: Autora, 2022.

O Gráfico 3 mostra o comportamento dos cps 4 e 5 com deformação interrompida até 80% da deformação total, sendo retirados em seguida. O cp 4 pré-deformado foi submetido novamente ao ensaio até sua ruptura completa, indicando que houve um efetivo encruamento com o aumento da tensão de escoamento de 140,0 MPa para 300,7 MPa (aumento de 115 %), forte indicativo de crescimento de defeitos microestruturais, em especiais de discordâncias.

Outra análise do Gráfico 3 mostra o comportamento do cp 5 pré-deformado submetido ao procedimento de pulsos elétricos com ciclos de corrente de pico de 300 A por 0,1 s e corrente de base de 5 A por 0,1 s no total de aplicação de 2,6 s. A temperatura, aferida por pirômetro ótico durante, subiu de 27 °C para apenas 32 °C. Em seguida o cp 5 foi recolocado no equipamento de tração, sendo indicado claramente alterações no seu comportamento, quando comparado ao cp 4 na mesma condição de pré-deformação (sem recebimento de pulsos elétricos). A tensão de escoamento após o procedimento de pulsos elétricos no cp 5 pré-deformado foi de 250,0 MPa, enquanto para o cp 4 pré-deformado (sem recebimento dos pulsos elétricos) foi de 300,7 MPa, indicando um decréscimo de 17%, forte indicativo de atuação de mecanismo de amolecimento na microestrutura, como uma possível redução da densidade de discordâncias resultante do fluxo de elétrons dos pulsos elétricos aplicados anteriormente. Outro comportamento significativo foi que, após a pré-deformação, o cp4 entrou no regime plástico com a redução da tensão até a ruptura, enquanto o cp 5 pré-deformado e submetido aos pulsos elétricos mostrou comportamento similar ao material de origem, iniciando o regime plástico com o aumento da tensão sob um mecanismo de tensão x deformação serrilhada, atingindo uma tensão máxima para logo depois ocorrer o seu decaimento (estricção) até a ruptura. Embora a tensão máxima alcançada após o autorreparo no cp 5 tenha sido de 274,5 MPa, menor que a de 300,7 MPa do cp 4 sem autorreparo, o cp 5 pré-deformado após o autorreparo mostrou maior ductilidade, alcançando 9,6 % da deformação até a ruptura contra 6,1 % da deformação de ruptura do cp 4 pré-deformado. O ganho significativo na ductilidade é um forte indicativo de que os parâmetros de processo adotados no respectivo trabalho foram efetivos na promoção de mecanismos que promoveram a recuperação parcial da microestrutura na condição pré-deformada, sugerindo a redução de defeitos microestruturais, os quais devem ser analisados de forma detalhada via microscopia eletrônica de varredura para uma correlação mais específica com os mecanismos de endurecimento e amolecimento envolvidos.

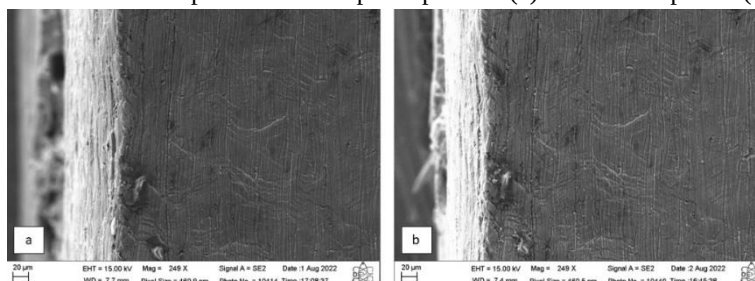
Gráfico 3 – Comparativo do comportamento à tração dos cps 4 e 5 pré deformados à 80% da deformação total; cp 4 recolocado até a ruptura; e cp 5 (pré deformado) após autorreparo por pulsos elétricos.



Fonte: Autora, 2022.

As superfícies do corpo de prova 5 foram caracterizadas com técnica de MEV-FEG em dois momentos. No primeiro, foi realizada a análise do cp submetido ao ensaio de tração ao ensaio de tração interrompido até 80% da deformação de ruptura conforme a Figura 4-a. E, no segundo momento, o cp que havia sido pré-deformado plasticamente e sujeito ao autorreparo por pulsos elétricos Figura 4-b. Ao avaliar as microscopias de uma mesma área foi perceptível observar que há um nível superficial não houve reparo efetivo dos defeitos superficiais.

Figura 4 – MEV-FEG das superfícies do corpo de prova 5 (a) sem autorreparo e (b) com autorreparo.



Fonte: Autora, 2022.

Conclusões

O material investigado neste estudo foi uma liga Al-Mg da série 5083. Com auxílio de técnicas para determinação de análises químicas foi possível identificar com EDS o Mg aparecendo com 3,45 % em peso sendo pouco inferior ao valor nominal (entre 4,0 e 4,9 %). E, com DRX foram determinadas a presença das fases Al_8Mn_5 , $Al_{3,21}Si_{0,47}$, $AlCrFe_2$ e $AgAl_6Mg_{42}$, que influenciam diretamente na densidade de discordâncias submetidas a deformações plásticas e elucidaram o entendimento dos fenômenos de amaciamento e endurecimento simultâneos observados nos gráficos de tensão-deformação.

Para os ensaios de tração através de três amostras originais foram obtidos os valores médios de a tensão máxima de 218,14 N/mm², com desvio padrão de 3,045 MPa, e deformação total de 17,2%. Outros cps foram submetidos ao ensaio de tração até 80% da deformação de ruptura para inserção dos defeitos microestruturais. O cp 4 pré-deformado foi submetido novamente ao ensaio até sua ruptura completa, indicando que houve um efetivo encruamento com o aumento da tensão de escoamento de 140,0 MPa para 300,7 MPa (aumento de 115 %), forte indicativo de crescimento de defeitos microestruturais, em especiais de discordâncias. Já o cp 5 que foi submetido ao mecanismo de autorreparo com os parâmetros de processamento de corrente passante de 300A durante um tempo de ciclo de 2,6s e tempo de subida e de descida dos patamares de 0,1s obteve um aumento significativo da tensão máxima de 209,276 N/mm² para 274,514 N/mm².

Ao comparar as curvas do cps 4 e 5 rompidos foi possível verificar que a tensão de escoamento após o procedimento de pulsos elétricos no cp 5 pré-deformado foi de 250,0 MPa, enquanto para o cp 4 pré-deformado foi de 300,7 MPa, indicando um decréscimo de 17%, forte indicativo de atuação de mecanismo de amolecimento na microestrutura, como uma possível redução da densidade de discordâncias resultante do fluxo de elétrons dos pulsos elétricos aplicados. Embora a tensão máxima alcançada após o autorreparo no cp 5 tenha sido de 274,5 MPa, menor que a de 300,7 MPa do cp 4 sem autorreparo, o cp 5 pré-deformado após o autorreparo mostrou maior ductilidade, alcançando 9,6 % da deformação até a ruptura contra 6,1% da deformação de ruptura do cp 4 pré-deformado. Em adição foi feita uma análise de MEV-FEG nas superfícies do cp 5 antes e depois do autorreparo, no entanto, não foram detectados resultados observáveis. Em geral, pode-se verificar que o mecanismo de autorreparo por pulsos elétricos se mostrou promissor.

Agradecimentos

Ao Programa de Recursos Humanos em Nanotecnologia e Novos Materiais Aplicados ao Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH 32.1) e a AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- V. Kilicli, X. Yan, N. Salowitz, and P. K. Rohatgi, "Recent Advancements in Self-Healing Metallic Materials and Self-Healing Metal Matrix Composites," *JOM*, vol. 70, no. 6. Minerals, Metals and Materials Society, pp. 846–854, Jun. 01, 2018. doi: 10.1007/s11837-018-2835-y.
- E. Canepa, R. Stifanese, L. Merotto, and P. Traverso, "Corrosion behaviour of aluminium alloys in deepsea environment: A review and the KM3NeT test results," *Marine Structures*, vol. 59, pp. 271–284, May 2018, doi: 10.1016/j.marstruc.2018.02.006.
- N. V. Ngoc, "CORROSION FATIGUE BEHAVIORS OF ALUMINUM ALLOYS FOR OFFSHORE APPLICATIONS," 2016.
- Y. Ali Fageehi and R. Saminathan, "Investigation on the Effect of Thermal and Mechanical Treatment to the Offshore Corrosion Behavior of 6351 Aluminum Alloy in Red Sea Environments," *International Journal of Analytical Chemistry*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8826366.
- M. Gelfgat, A. Alkhimenko, and S. Kolesov, "Corrosion and the role of structural aluminum alloys in the construction of oil and gas wells," in *E3S Web of Conferences*, Oct. 2019, vol. 121. doi: 10.1051/e3sconf/201912104003.
- S. Bott, I. De, L. F. G. de Souza, J. C. G. Teixeira, and P. R. Rios, "High-Strength Steel Development for Pipelines: A Brazilian Perspective."
- B. Grabowski and C. C. Tasan, "Self-healing metals," in *Advances in Polymer Science*, vol. 273, Springer New York LLC, 2016, pp. 387–408. doi: 10.1007/12_2015_337.
- S. Zhang, N. van Dijk, and S. van der Zwaag, "A Review of Self-healing Metals: Fundamentals, Design Principles and Performance," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 33, no. 9. Chinese Society for Metals, pp. 1167–1179, Sep. 01, 2020. doi: 10.1007/s40195-020-01102-3.
- J. B. Ferguson, B. F. Schultz, and P. K. Rohatgi, "Self-healing metals and metal matrix composites," *JOM*, vol. 66, no. 6. Minerals, Metals and Materials Society, pp. 866–871, 2014. doi: 10.1007/s11837-014-0912-4.
- H. Conrad, "Effects of electric current on solid state phase transformations in metals," 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/msea.
- J. Jung, Y. Ju, Y. Morita, and Y. Toku, "Enhancement of fatigue life of aluminum alloy affected by the density of pulsed electric current," *International Journal of Fatigue*, vol. 103, pp. 419–425, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.06.021.
- W. Wu, Y. Wang, J. Wang, and S. Wei, "Effect of electrical pulse on the precipitates and material strength of 2024 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering A*, vol. 608, pp. 190–198, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.msea.2014.04.071.
- Y. S. Zheng, G. Y. Tang, J. Kuang, and X. P. Zheng, "Effect of electropulse on solid solution treatment of 6061 aluminum alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 615. Elsevier Ltd, pp. 849–853, Dec. 05, 2014. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.062.
- N. V. ASTM – American Society for Testing Materials. ASTM E8/E8M – 21 - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. In: *Annual Book of ASTM Standards*, 1987.