

Estudo de caso: Caracterização Microestrutural e Mecânica de uma Cordoalha Utilizada em Linhas Aéreas de Transmissão de Energia

Nunes J. D. S.¹, Ferreira J.C.², Sousa J. P. ², Furtado I. A ¹, Carvalho M. C.N.¹, S.F. Rodrigues S.F. ^{1,2}.

1. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão.

2. Universidade Federal do Piauí.

Resumo

O presente estudo teve como justificativa a necessidade de compreender quais as características do material utilizado em cordoalhas com aplicação em rede aéreas de transmissão de energia e quais mecanismos levaram falha em serviço. O objetivo foi caracterizar e classificar cordoalhas novas e usadas, oxidadas e não oxidadas, por meio de análises microestruturais, químicas e mecânicas. Para isso, foram realizadas técnicas de caracterização como MO, MEV (com EDS), microdureza e tração em amostras preparadas de acordo com normas técnicas. Os resultados mostraram que as cordoalhas oxidadas sofreram perda significativa da seção transversal e da camada protetora, composta por alumínio em desacordo com a norma que exige zinco, levando a redução considerável da resistência mecânica, enquanto as cordoalhas novas atenderam aos requisitos normativos apesar de apresentarem algumas inclusões e porosidades. Concluiu-se que a oxidação compromete severamente a integridade estrutural das cordoalhas, sendo essencial a adoção rigorosa de revestimentos adequados e inspeções periódicas para garantir sua durabilidade e segurança.

Palavras-chave: Cordoalhas, Ferrita, perlita, microdureza.

Introdução

As cordoalhas são elementos estruturais formados por fios de aço torcidos entre si, amplamente utilizadas em aplicações da engenharia civil, como linhas de transmissão de energia e sistemas de ancoragem. Sua principal função é resistir a esforços de tração, garantindo estabilidade e segurança às estruturas. A resistência mecânica, a durabilidade e a confiabilidade das cordoalhas são fatores essenciais para a boa performance desses sistemas onde elas são empregadas. Um aspecto fundamental para preservar as propriedades supracitadas é evitar a oxidação do aço. A oxidação, ou corrosão, compromete a integridade dos fios metálicos, reduzindo sua resistência e podendo levar a falhas estruturais ao longo do tempo.

Sabe-se que, a proteção contra a umidade, agentes químicos e atmosferas agressivas é crucial para esse tipo de componente. Técnicas como galvanização, aplicação de graxa anticorrosiva, revestimentos plásticos e inspeções periódicas são medidas comuns para garantir a longevidade das cordoalhas e a segurança das estruturas nas quais estão aplicadas.

Neste estudo foram disponibilizadas cordoalhas classificadas como novas e utilizadas. A **Figura 1** mostra imagens de cordoalhas no estado novo, assim como cordoalhas que sofreram oxidação em campo. A inspeção visual permitiu constatar que a cordoalha utilizada sofreu oxidação em algumas regiões de forma aproximadamente equidistante e descontínua.



Figura 1. Imagens de cordoalhas no estado novo e oxidado (utilizadas em serviço).

Sabe-se que a oxidação leva a perda de material e conseqüentemente pode levar a falha. Dessa maneira, foi proposto um estudo cujo objetivo foi investigar e classificar o material por meio de análise composicional, microestrutural e de comportamento mecânico.

Metodologia

As amostras recebidas foram submetidas a técnicas de caracterização com o objetivo de obter informações relevantes sobre os materiais analisados. Inicialmente, as cordoalhas foram cortadas em uma cortadora tipo cutoff com refrigeração, em seguida embutidas em resina polimérica termofixa, lixadas (320 - 1200 mesh), polidas (suspensão de alumina de granulometria até 0,3 micron) e atacadas quimicamente com uma solução nital 1% por um período de 2 a 5 segundos. A microestrutura do material da cordoalha foi analisada por Microscopia Óptica (Zeiss Axiovert 7) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A camada foi analisada por Espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A carga de ruptura e a deformação foi verificada por ensaio de tração (Instron 100 - Norma A370-21). A microdureza foi verificada por meio de um Microdurometro SHIMADZU HMV – 2 Series utilizando uma carga de 0,3kgf por um tempo 15s.

Resultados e discussão

Análise por MO dos fios da cordoalha no estado oxidado e não oxidado.

Na **Figura 2** são mostradas imagens da seção transversal e longitudinal dos cabos das cordoalhas nas condições oxidado e não-oxidado. Na cordoalha que não sofreu oxidação foi possível observar um fina camada que foi produzida durante o processo de galvanização. Por outro lado, nas cordoalhas que sofreram o processo de deterioração por corrosão não se observa mais as finas camada anteriormente apresentadas. Além disso, houve perda de massa considerável da seção transversal após a oxidação, com cerca de redução em 50% da seção transversal em alguns fios.

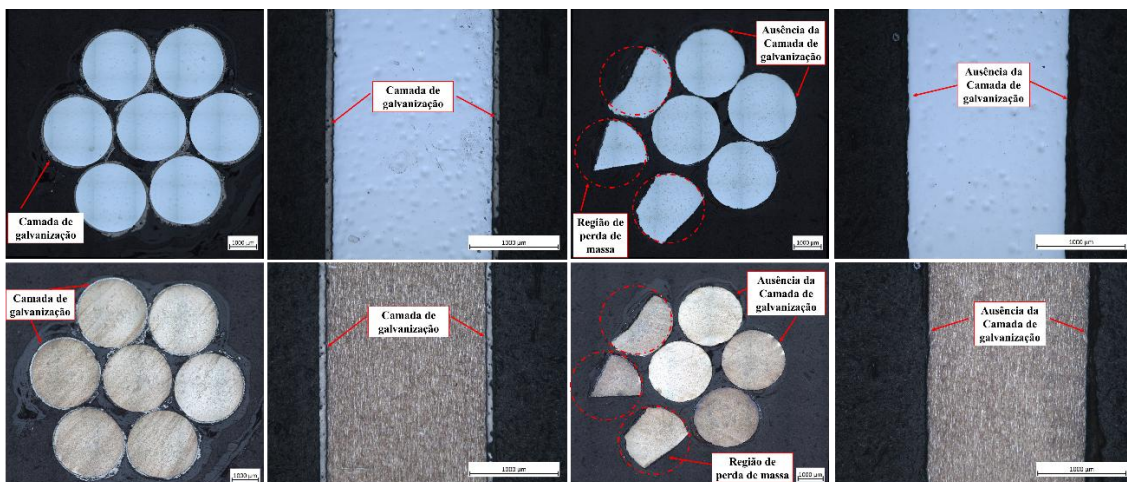


Figura 2. Microscopias ópticas panorâmicas das seções transversais e longitudinais das cordoalhas nos estados usado-Não oxidados e usados-oxidados.

Na **Figura 3 (a) e (b)** são mostrados os diâmetros da seção transversal dos fios da cordoalha e a espessura da camada de galvanização, respectivamente. As dimensões dos cabos estão de acordo com a normal ABNT NBR 16730 que trata dos requisitos para as cordoalhas de fios de aço zincados para eletrificação. A espessura de camada medida via software foi de aproximadamente $73(\pm 1,2)$ μm .

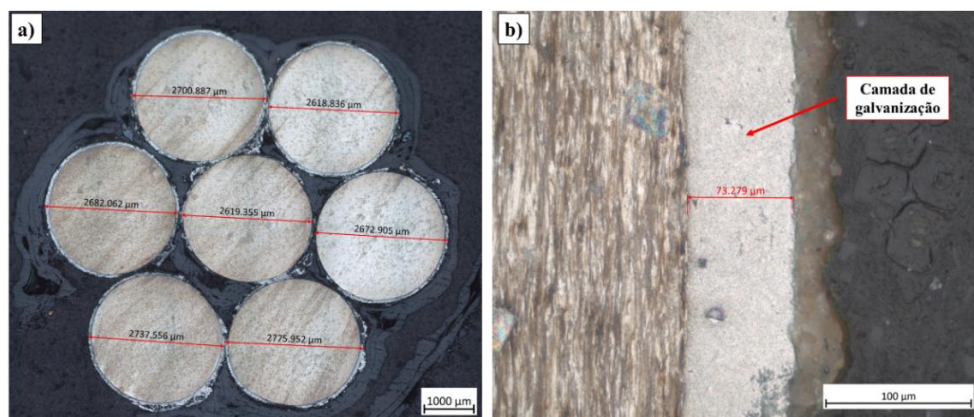


Figura 3. Microscopias ópticas panorâmicas das seções transversais das cordoalhas nos estados (a) usado não-oxidados com os seus respectivos diâmetros e (b) camada de galvanização com espessura média.

Análise do comportamento mecânico dos fios da cordoalha nas condições oxidado e não oxidado.

Na **Figura 4** são apresentadas as curvas força-deformação das condições Oxidado e não-oxidada. Observa-se a redução da força máxima de solitação e de ruptura com valores aproximados de 7,1kN e 4,6kN para o fio não-oxidado e 4,1kN e 3,0 kN para o fio oxidado, respectivamente. Conforme mostrado na **Figura 2**, fica evidente que a perda de massa devido a oxidação do fio foi responsável pela redução do esforço máximo e de ruptura.

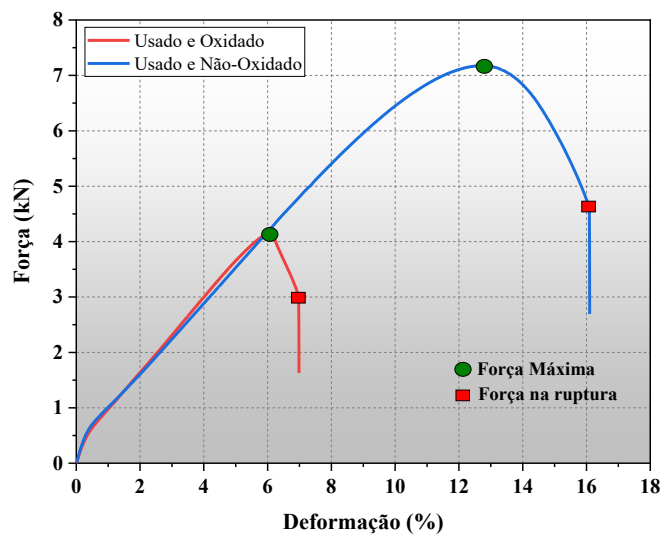


Figura 4. Gráfico força – deformação para os cabos da cordoalha nas condições usado oxidado e não-oxidado mostrando as força máxima e a força na ruptura.

Em termo de carga de ruptura mínima, a norma supracitada classifica a cordoalha como de média resistência (MR ou SM) aqueles que possuem carga de ruptura superior a 24,30kN e inferior a 36,3kN. No caso de cada fio que compõem a cordoalha, a carga mínima para essa faixa de resistência é cerca de 3,47kN a 5,18kN. Desse modo, de acordo com a **Figura 4** o material no estado não oxidado atende aos requisitos da norma, sendo classificado como material de média resistência (MR). Por outro lado, o material que sofre oxidação, em razão da redução de área deixou de atender aos requisitos anteriormente citados, em termo de carga mínima para a classificação como um material de média resistência.

Análise por MEV /EDS dos fios da cordoalha na condição utilizada.

Na **Figura 5** são mostradas imagens MEV das seções transversal e longitudinal do fio utilizado, porém não-oxidado. Vale ressaltar que a microestrutura do fio oxidado e não-oxidado são semelhantes, desse modo, usou-se como imagem representativa as microscopias do fio não-oxidado.

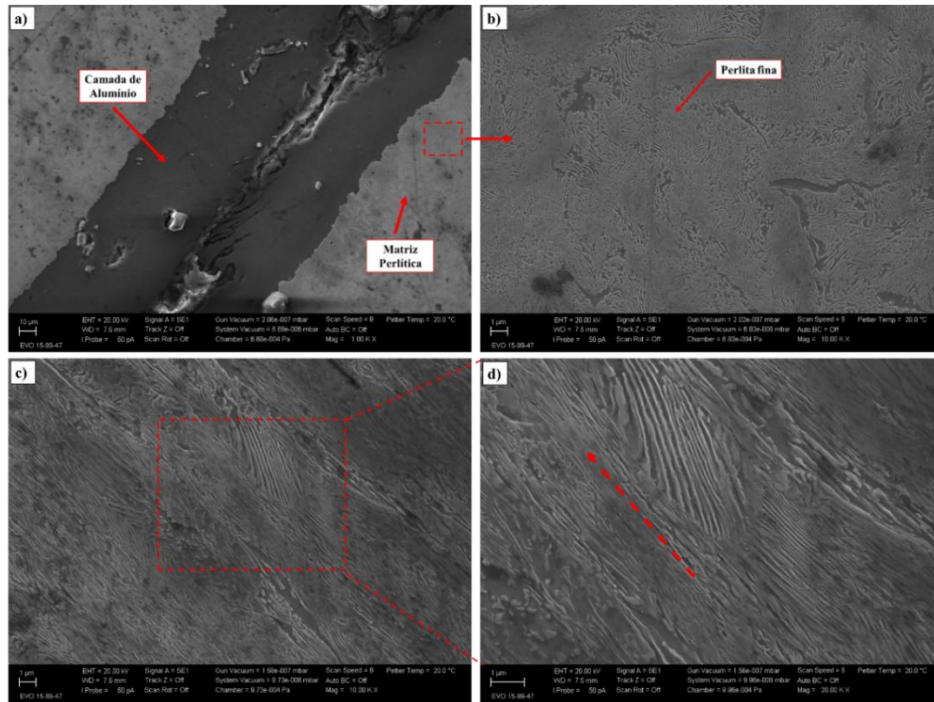


Figura 5. Imagens MEV das seções transversal e longitudinal de cabos da cordoalha onde se observa a (a) camada de alumínio formada durante o processo de galvanização e a (b) matriz perlítica do material.

Na **Figura 5(a)** observa-se a interface entre o material base e a camada de galvanização constituída majoritariamente de alumínio (o que será provado em seção posterior). Por outro lado, pode ser visto na **Figura 5 (b)** que o material base possui uma matriz aproximadamente 100% perlítica que é microconstituente formada por estruturas lamelares alternadas de fases ferrita e cementita (Fe_3C). As imagens MEV da seção longitudinal são apresentadas na **Figura 5(c)** e **(d)** que mostram a perlita alinhada com a direção de trefilação, processo de fabricação utilizado para confecção dos fios.

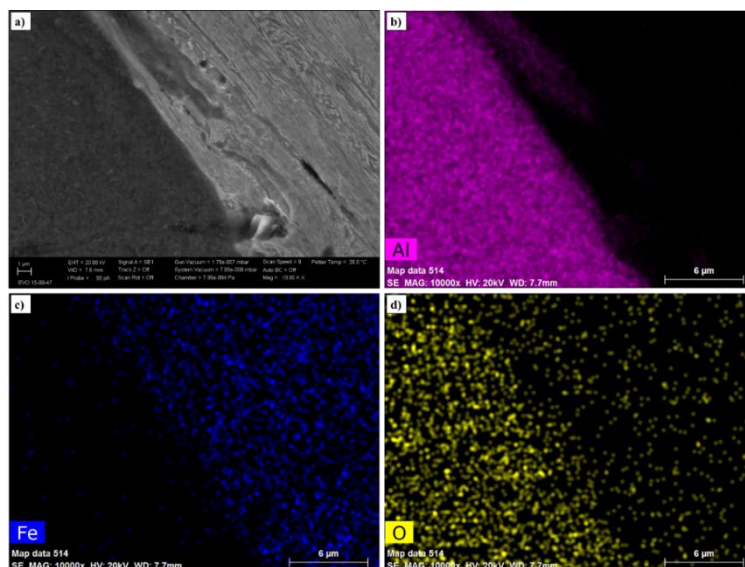


Figura 6. Microanálise EDS da (a) interface camada-material base mostrando os elementos presentes em cada região e que a camada de galvanização é constituída majoritariamente por (b) alumínio, (c) ferro e (d) oxigênio.

Com base nas microestruturas observadas na **Figura 5** o material base dos fios da cordoalha apresentam matriz completamente perlítica. Essa microestrutura é típica de aços SAE 1070 e 1080 que são formados próxima a composição eutetóide em torno de 0,77% de carbono. Na região da interface camada – material base **Figura 6(a)** foram realizadas microanálise EDS que confirmam a presença de alumínio, **Figura 6(b)**, na camada galvanizada, ferro no material base, **Figura (c)**, por se tratar de um aço eutetóide, e traços de oxigênio, **Figura (d)**.

Análise por MO dos fios da cordoalha Não-utilizado

Na **Figura 7** são apresentadas as MO da cordoalha nova. São observadas nas seções transversais, **Figura 7(a)**, e longitudinais, **Figura 7(b) a (d)** a presença da camada de galvanização conforme requerida pela ABNT NBR 16730.

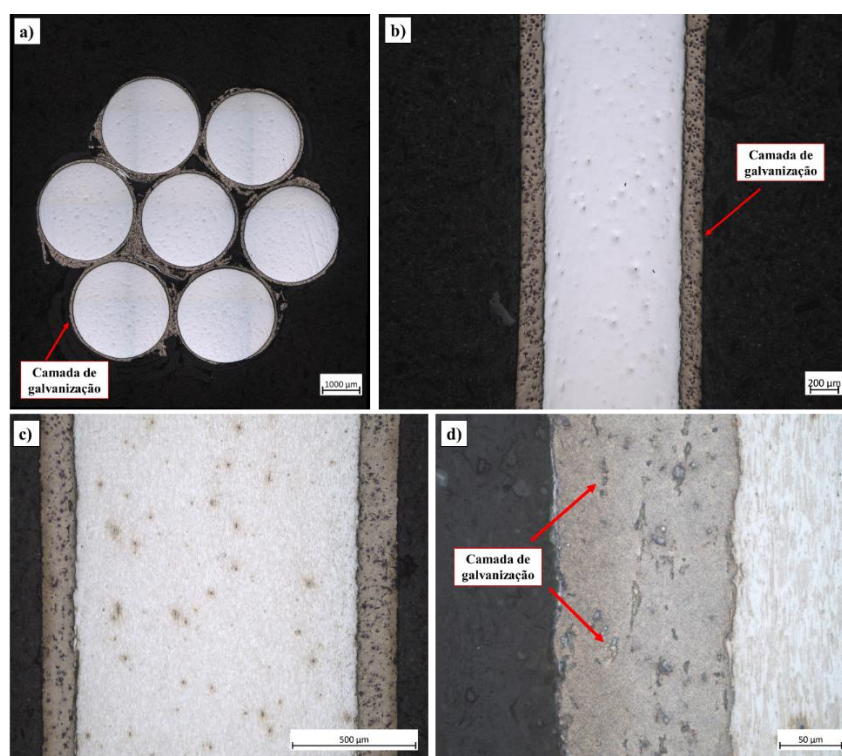


Figura 7. Microscopias ópticas (a) panorâmicas das seções transversais da cordoalha no estado novo e camada de galvanização com (b), (c) e (d) ampliações mostrando inclusões de silício.

A camada de galvanização apresenta algumas regiões mais escuras, **Figura 7**, que podem ser inclusões ou falhas na camada que pode levar ao processo de oxidação por penetração do oxigênio pelos poros ou por descontinuidade da camada de proteção.

4.4 Análise do comportamento mecânico dos fios da cordoalha na condição nova

A **Figura 8** apresenta as curvas força-deformação das cordoalhas na condição nova. Observa-se que a força máxima de solitação e de ruptura atingiu valores médios de

5,70kN e 4,10kN, respectivamente. Embora os valores médios obtidos sejam inferiores a aqueles encontrados na condição usado e não oxidado, destaca-se que a cordoalha na condição nova está dentro das especificações estabelecidas em norma (ABNT NBR 16730). A saber, segundo a supracitada norma **ABNT NBR 16730**, a cordoalha com diâmetro nominal 7,9mm (5/16") é composta de 7 fios com diâmetros nominais de 2,64mm e se enquadra, mediante a carga mínima de ruptura observada, como material de média resistência (MR ou SM), uma vez que apresentou carga de ruptura total superior a 24,3 kN para a cordoalha e 3,47kN para os fios que a compõem.

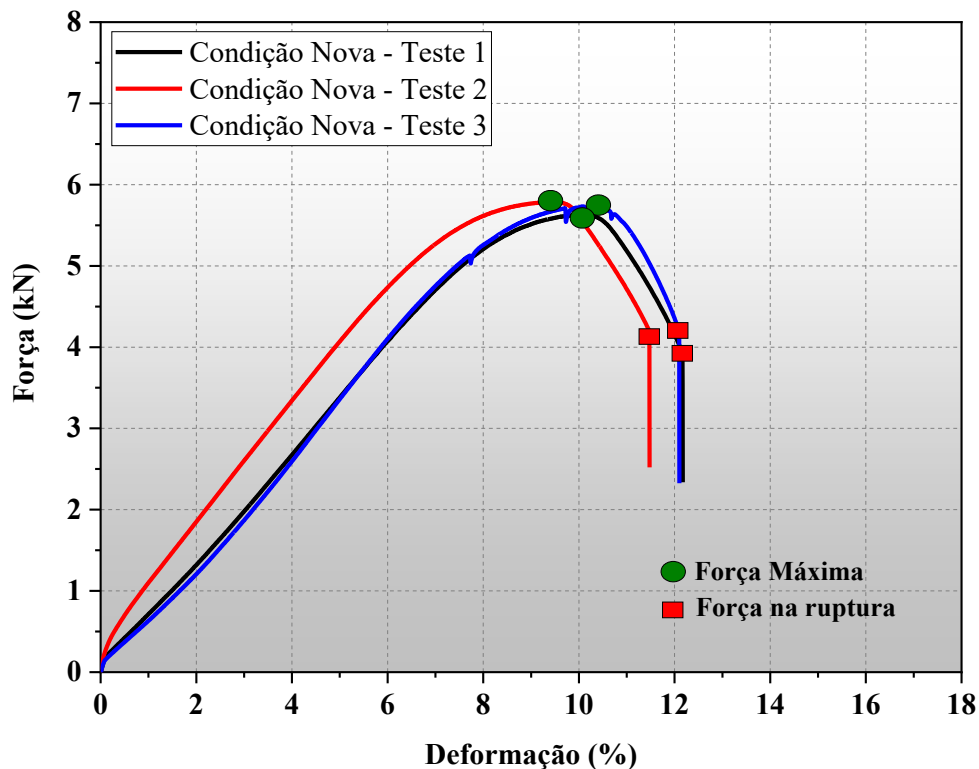


Figura 8. Gráfico força – deformação para os cabos da cordoalha nas condições nova.

Análise por MEV/EDS dos fios da cordoalha Não-utilizado

Na **Figura 9(a)** e **(b)** são mostradas as imagens de microscopia eletrônica de varredura das seções transversais onde se observa a camada de alumínio e a matriz perlítica-ferrítica, enquanto na **Figura 9(c)** e **(d)** são apresentadas as imagens longitudinais dos fios da cordoalha nova que revelam o alinhamento das fases com a direção de processamento. Na **Figura 10 (a), (b)** e **(c)** são apresentadas imagem MEV da região da interface metal base e da camada de galvanização com microanálise EDS. A análise confirmou que de fato a camada é formada por alumínio com inclusões não-metálicas a base de silício. Desse modo, a presença de alumínio na camada está em desacordo com a normal anteriormente mencionado. Uma vez que a normal trata de dos

requisitos das cordoalhas de fios de aço zincados para eletrificação e, portanto, a camada deveria ser composta de zinco (Zn).

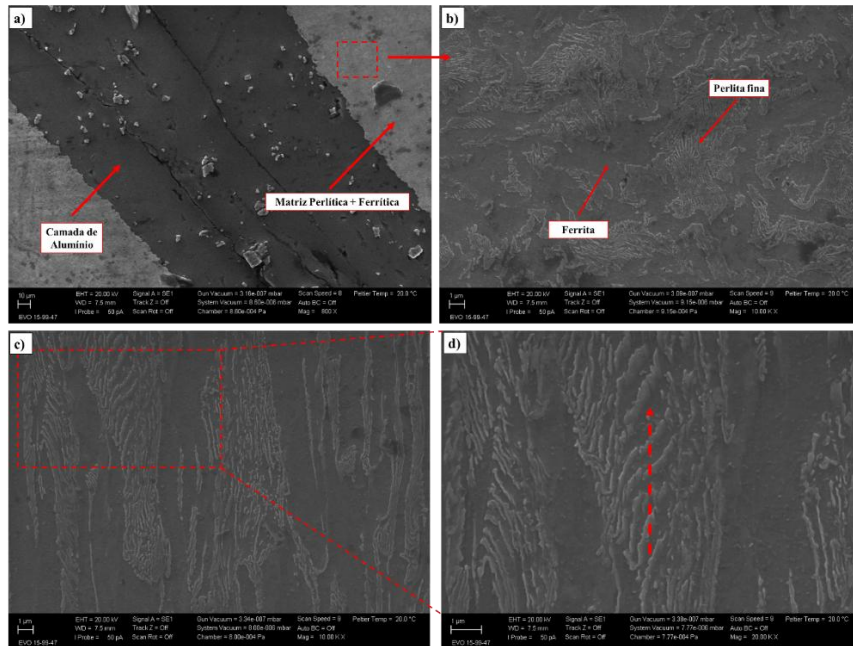


Figura 9. Imagens MEV das seções transversal e longitudinal do cabo da cordoalha nova onde se observa a (a) camada de alumínio formada durante o processo de galvanização e a (b-d) matriz perlítica-ferrítica do material. Além disso, (d) as colônias de ferrita se alinha com a direção de trefilação.

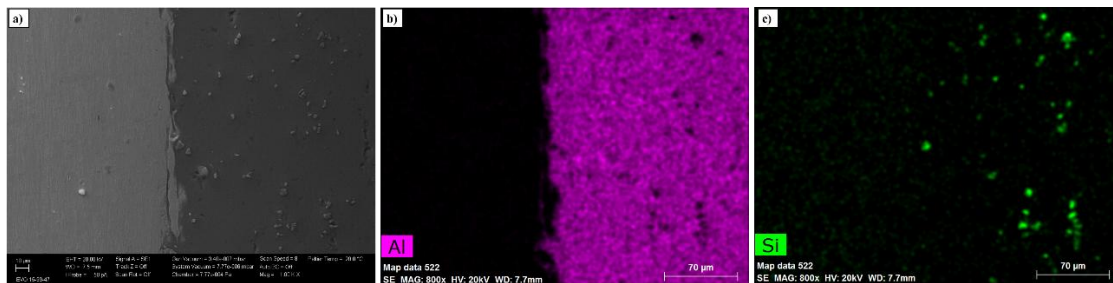


Figura 10. Microanálise EDS da interface camada-material base mostrando os elementos presentes em cada região e que a camada de galvanização é constituída majoritariamente por alumínio e algumas inclusões a base de silício.

Dureza Vickers do metal base e da camada das cordoalhas

Na **Figura 11** são mostradas as indentações realizadas no metal base e na camada de proteção das amostras da cordoalha utilizada e nova. Na **Figura 11 (a)** é mostrado as indentações na camada de proteção e no metal base da cordoalha nova. Além disso, a espessura de camada média foi cerca de 144 μ m. Também se observa que devido grande diferença entre a dureza do metal base e da camada, as dimensões das indentações são significativas. Na **Figura 11 (b)** se mostra a espessura de camada da cordoalha utilizada que apresentou, embora aqui não mostrado, a mesma diferença de tamanho das indentações entre a região do metal base e da camada. Na **Figura 11 (c)** e **(d)** são

mostrados os gráficos de microdureza para as cordoalhas nova e utilizada, respectivamente. A microdureza dos fios da cordoalha nova apresentou valores médios de 50HV e 400HV para a camada de proteção e metal base, respectivamente. Por outro lado, os fios da cordoalha na condição utilizada apresentaram valores de microdureza para a camada de proteção e para o metal base de 61HV e 463HV, respectivamente. Essa diferença entre a dureza do metal base das cordoalhas está relacionada aos diferentes tipos de aço empregada em cada cordoalha como já citado.

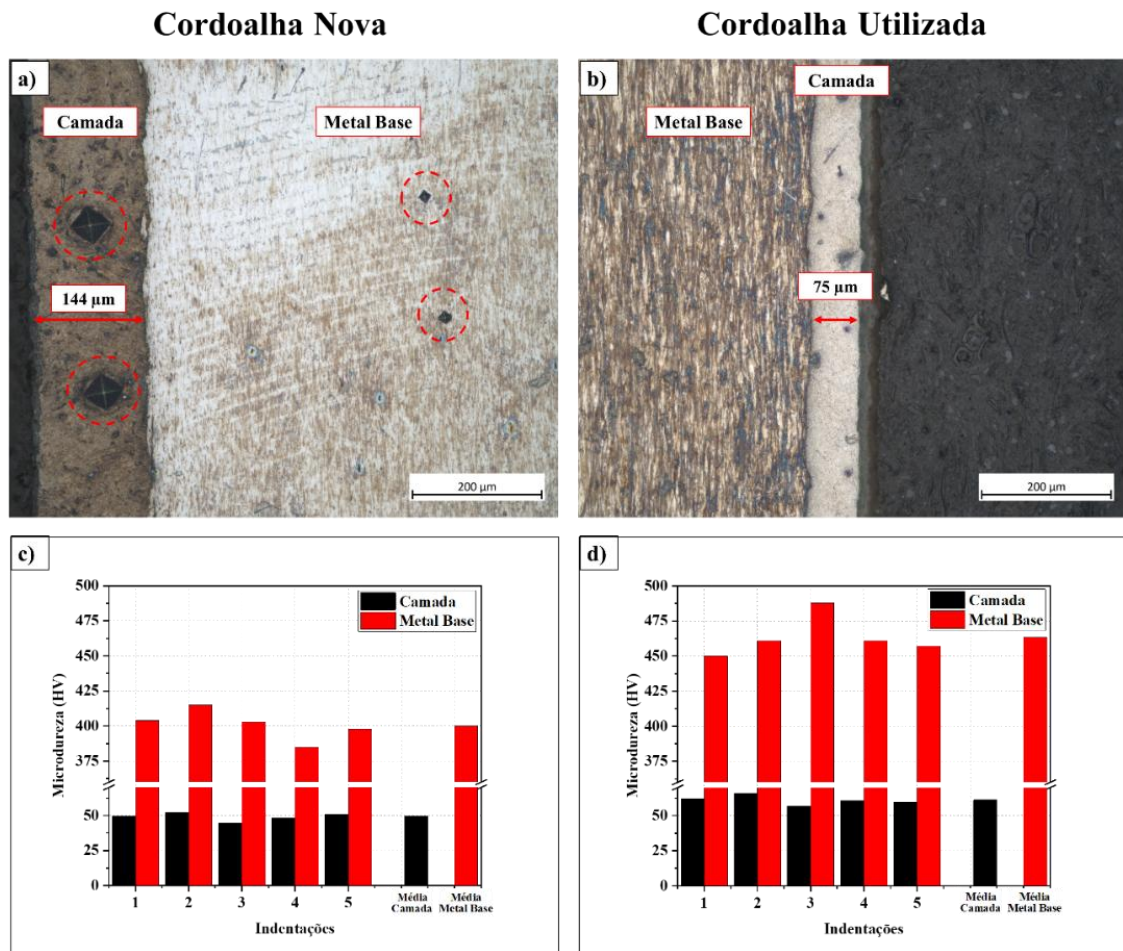


Figura 11. Imagens de microscopias ópticas das indentações no (a) e (b) metal base e na camada de proteção, assim como indicação da espessura da camada e gráficos de microdureza das (c) cordoalhas utilizadas e (d) da cordoalha utilizada.

Conclusões

A investigação realizada permitiu caracterizar e analisar as cordoalhas, identificando os efeitos da oxidação sobre as propriedades mecânicas do material. Foi constatado que a oxidação promoveu a deterioração significativa da camada de proteção anticorrosiva dos fios que compõem as cordoalhas, composta por uma camada de galvanização à base de alumínio, o que está em desacordo com a norma ABNT NBR 16730, que especifica revestimento de zinco. A corrosão provocou redução, em alguns

fios, até 50% da seção transversal, comprometendo a integridade estrutural e resultando em diminuição significativa da resistência mecânica, conforme evidenciado nos ensaios de tração. As análises microestruturais mostraram que o material base das cordoalhas apresenta microestrutura perlítica, típica de aços eutetóides SAE 1070/1080 (cordoalha utilizada) e perlítica-ferrítica, típicas de aços SAE 1045 (cordoalha nova), com alinhamento das fases devido ao processo de trefilação. A camada protetora revelou-se não homogênea e, em alguns casos, com inclusões e poros, o que pode ter favorecido a penetração de agentes corrosivos e a subsequente oxidação. Os resultados de microdureza confirmam que o metal base das cordoalhas em diferentes. Em síntese, os resultados evidenciam que a oxidação das cordoalhas compromete significativamente sua capacidade de suportar esforços de tração, reduzindo a segurança e a vida útil das estruturas onde são aplicadas.

Agradecimentos

Agradeço ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA) pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Expresso também minha gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo à pesquisa por meio da concessão de bolsa, essencial para a realização deste estudo.

Referências

ABNT. NBR 16730:2018 – Cordoalha de fios de aço zincados para eletrificação – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.