ESTUDO COMPARATIVO DAS LIGAS DE AÇO INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO AL-6XN/6MO E AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 316L

Sancho, E.O.[1*]; Endrigo, J.C.[2]; Araujo, F.T.V[3]; Cabral, M.J.[4] e Magalhaes, R.A.[5]

1 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, esancho@unifor.br

2 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, julio.endrigo198@gmail.com

3 - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, flaviatelis@unifor.br

4 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, maurojcabral@unifor.br

5 - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Av. Washington Soares, 1321, Fortaleza, CEP 60811-905, CE. Brasil, rafael.magalhaes@unifor.br

RESUMO

Na indústria farmacêutica existem tubulações de aço inoxidável 316L que transferem água com uma determinada concentração de sódio numa temperatura entre 80 e 90ºC, que devido aos efeitos da corrosão são anualmente substituídas. Foi implementado um teste com a liga AL6XN com o objetivo de estender sua vida útil, e, para fabricação da tubulação a solda TIG foi utilizada para união das peças de AL6XN com auxilio de um inserto. As soldas passaram por inspeções boroscópicas e não foram apontadas nenhuma falha. Foram realizados testes mecânicos para verificar o comportamento da liga, e, testes para corrosão realizados apontaram cerca de quatro

vezes menos massa perdida pela AL6XN comparado ao 316L. Devido a tubulação de AL6XN estar instalada entre uma cruzeta e um trocador de calor compostos pelo 316L, o fenômeno conhecido como corrosão galvânica acontece, acelerando o processo de corrosão desses componentes, não compensando o investimento.

Palavras-chave: *Farmacêutica. Corrosão. Molibdênio. TIG.*

INTRODUÇÃO

A história dos materiais está diretamente relacionada a história da humanidade em si tendo em vista que existem períodos históricos como a idade do cobre, a idade do bronze e a idade do ferro. Com o avanço da humanidade o homem passou a utilizar os metais com maior frequência, perícia e aplicabilidade, mas com essa elevada frequência de uso dos materiais

Segundo Callister (1), os materiais possuem maior influência na cultura do que a maioria percebe. Estão presentes nos meios de transportes, nas construções, nos meios de comunicação, em resumo todos os seguimentos do cotidiano são influenciados pelos materiais.

Antes da idade do cobre os humanos tinham acesso a um número limitado de materiais, como: pedra, madeira, argila e assim por diante. Segundo Callister (1), com o passar dos anos novas técnicas de produção de materiais foram sendo desenvolvidas, também foram sendo descobertas que as propriedades de um material podiam ser alteradas através de tratamentos térmicos e pela adição de elementos de liga.

Porém não é de muito tempo que os humanos possuem as técnicas necessárias para se trabalhar com maestria esses metais. Segundo Callister (1), foi somente nos últimos 100 anos que, as técnicas de mudança significativa dos materiais foram desenvolvidas e com isso diversos materiais foram criados para atender a necessidade da era moderna.

Segundo Ribeiro (2), os materiais metálicos são majoritariamente constituídos de elementos químicos metálicos, podendo ser classificados em metais ferrosos e não ferrosos, sendo possível a adição de elementos não metálicos, formando assim as ligas metálicas. Alguns elementos metálicos na natureza são encontrados associados a outros elementos químicos e com isso se faz necessário a utilização de processos químicos e físicos até a obtenção do material desejado. Para o ferro pode ser adicionado uma determinada quantidade de carbono para obtenção de ferro fundido que tem uma concentração de 2,11 a 6,67% de carbono e o aço cuja variação é de 0,008 até 2,11% de carbono.

Com a criação/alteração desses materiais é que se torna possível a humanidade avançar tecnologicamente e tornar mais acessível os produtos de uma maneira geral devido a um aumento nas capacidades de obtenção de matérias primas e transformações das mesmas, mas isso também traz um outro desafio, com o aumento no uso de um modo geral desses materiais, pode ser provocada uma escassez de matéria prima.

Segundo Gallagher (3), as ligas niqueladas foram sendo desenvolvidas devido a necessidade de se trabalhar com líquidos corrosivos e em elevadas temperaturas, porém com esse desenvolvimento foram aparecendo outros desafios um deles é como realizar a união desses materiais, já que essas ligas são produzidas com um elevado controle térmico e mecânico para que suas propriedades mecânicas e anticorrosivas sejam as melhores possíveis. Tendo em vista que os controles de temperatura durante a solda são “limitados” se comparados com os de um laboratório por exemplo, o metal soldado e as zonas próximas ao aquecimento (também conhecido como ZTAs) podem ter suas propriedades comprometidas se comparadas ao material que não sofreu processos como solda, por isso que as partes soldadas são geralmente consideradas o ponto fraco para a maioria das aplicações.

Com isso tem-se esse estudo que compara duas dessas ligas desenvolvidas, umas delas é o aço inoxidável super austenítico AL-6XN/6MO e a outra é o aço inoxidável austenítico 316L, que foram aplicadas na indústria ao qual o autor deste documento trabalhou. Os requisitos que esses materiais precisam atender para os processos fabris são resistência a corrosão e não contaminação do produto. Na

fábrica esses materiais formam tubulações, que fazem a transferência de água com uma determinada concentração de sódio a uma temperatura de 80 a 90 °C.

A troca da tubulação de aço 316L deve ser realizada anualmente, (preferencialmente no período de coletivas) devido a corrosão e formação de pites que acabam contaminando o produto, a tubulação de AL-6XN foi instalada em abril de 2022 e apresentou comportamento satisfatório em relação a resistência a corrosão, com inspeções boroscopias executas no decorrer do acompanhamento do autor, percebeu-se que as paredes da tubulação de AL6XN ainda apresentavam aspecto de novo em dezembro de 2023.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo classifica-se como qualitativa e quantitativo pois entrega resultados tanto de forma numérica como de forma contextualizada, é de natureza aplicada pois tenta resolver um problema utilizando conhecimento científico de forma direta com objetivo exploratório e explicativo cujos procedimentos executados foram comum a um estudo de caso pois permitiu ao autor aprofundar nos assuntos relacionados a este trabalho.

Foi escolhido uma tubulação de uma indústria farmacêutica, localizada na região metropolitana de Fortaleza, capital do estado do Ceará, Brasil. A empresa em questão possuí uma longa história, tendo iniciado oficialmente no ano de 1912, na Alemanha.

Todo o material (tubos, curvas, reduções, niples, anéis de vedação e anel C22) foi adquirido com empresas líderes de mercado, com certificados de qualidade do material, atestando a composição da liga e acabamento superficial, uma parte desse tipo de documento pode ser visto como exemplo na Figura 1.

Figura 1: Certificado de Qualidade.

Nº 91491/21

CERTIFICADO DE QUALIDADE

CLIENTE	FRESENIUS KABI DO BRASIL LTDA.				
S/ PEDIDO	4501281613	N/ PEDIDO	26259	NF	45033

Nos casos de Venda por Conta e Ordem ou Entrega Fatura, o número da NF se refere ao documento fiscal de Remessa.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	QTDE	UN
TUBE6MO2.0X.065-PO	TUBO 2,0 IN EM ACO LIGA TP AL6XN SF5	6	M

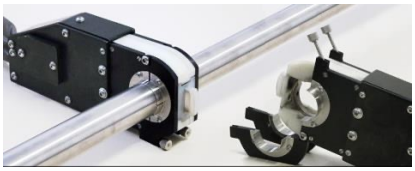
Nº DE CORRIDA: 583773 STATUS: APROVADO QUANTIDADE: 6 M

DOCUMENTOS
CERTIFICADO / Nº / COMPONENTE:
VNE 324, 328

Fonte: Stockval (2022).

Esses materiais foram soldados utilizando um cabeçote para solda TIG orbital, que realiza soldas de forma automática, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Cabeçote para solda orbital



Fonte: SPS Soldagem (2017).

Para realização e proteção dos cordões de soldas o gás argônio foi utilizado para realização de purga. Após a solda essas tubulações foram posicionadas, substituindo as tubulações anteriores. Após a montagem processos de limpeza dessas linhas foram realizados para dar continuidade ao processo produtivo.

Após a instalação duas datas foram definidas para a realização de ensaios de boroscopia, com o boroscópio mostrado na Figura 3. A fim de verificar o comportamento interno das ligas na aplicação, duas tubulações distintas foram inspecionadas: AL6XN e a de 316L. Após a realização das inspeções boroscópicas foram realizadas limpezas com gel decapante/passivante.

Figura 3: Boroscópio T22 duas lentes

Fonte: Endrigo (2022).

Foram utilizados dados quantitativos e qualitativos, obtidos a partir da utilização de referências e relatórios obtidos na empresa em relação aos testes das ligas e esses dados foram cruzados entre as ligas para atingir o objetivo desse estudo.

A tubulação de AL6XN instalada em abril de 2022 passou inicialmente pelos seguintes testes:

- Ensaio por líquido penetrante em 4 corpos de prova (2 corpos de prova para solda orbital automática e 2 corpos de prova para solda manual);
- Ensaio por dobramento guiado em 4 corpos de prova (2 corpos de prova para dobramento de face e 2 corpos de dobramento de raiz) seguindo as diretrizes da norma ASME IX-2021;
- Ensaio de tração em dois corpos de prova seguindo as diretrizes da norma ASME IX-2021;
- Ensaio de resistência à corrosão acelerada em 2 corpos de prova (realizado de acordo com a norma ASTM G48 utilizando o método A).

O material 316L é utilizado para compor outras tubulações que executam a mesma função que a tubulação de AL6XN e passou pelos mesmos testes acima mencionados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de soldagem usado para ambos os materiais foi do tipo orbital automática, com uma única diferença, pois no AL6XN é necessário fazer a utilização de um material de consumo, devido a segregação química. O cordão de solda na parte externa para o material 316L pode ser visto na Figura 4 está isento de qualquer defeito, comprovado por ensaio de liquido penetrante.

Figura 4 - Cordão de solda 316L

Fonte: Endrigo (2023).

O cordão de solda na parte externa para o material AL6XN pode ser visto na Figura 5, sendo possível perceber o inserto que foi utilizado durante o processo de soldagem, não caracterizando defeito no cordão de solda.

Figura 5 - Cordão de solda AL6XN

Fonte: Endrigo (2023).

O cordão de solda na parte interna para o material 316L pode ser visto com o auxílio do boroscópio na Figura 6.

Figura 6: Cordão de solda 316L boroscópio

Fonte: Endrigo (2023).

O cordão de solda na parte interna para o material AL6XN pode ser visto com o auxílio do boroscópio na Figura 7. Na tubulação de AL6XN é possível visualizar o inserto que foi consumido durante o processo de soldagem, não caracterizando defeito no cordão de solda.

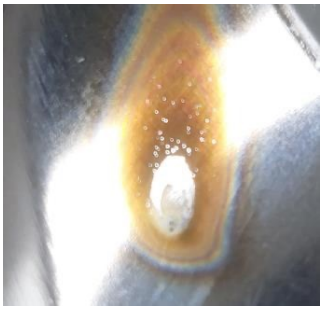
Figura 7: Cordão de solda AL6XN boroscópio

Fonte: Endrigo (2023).

É na análise de corrosão que é possível ver as maiores diferenças entre os materiais. Segundo Costa e Silva (4) com o aumento da taxa de molibdênio na liga tem-se um aumento na resistência a formação de pites em uma determinada temperatura, fato observado em teste de corrosão de temperatura crítica para a ocorrência de pites em solução 10% de $FeCl_3$ em função do teor de molibdênio, ratificando que a resistência a corrosão por pites da liga AL6XN é muito maior do que a do aço 316L.

Na Figura 8 é possível ver uma peça de 316L instalada numa linha paralela em abril de 2022 e removida em abril de 2023, após o corte é possível observar pequenos pontos onde o processo de corrosão por *piting* iniciou, apesar de não comprometer a tubulação em si, devido a finalidade da tubulação para não apresentar contaminação, existe a necessidade dessa substituição.

Figura 8: Peça de 316L com pites



Fonte: Endrigo (2023).

Com a problemática de substituições anuais dessa tubulação, foi dado início a um teste com um material mais nobre. Na Figura 9, é possível ver através da boroscopia que a tubulação instalada em abril de 2022, ainda possui uma aparência de nova através da imagem de abril de 2023.

Figura 9: Boroscopia AL6XN (1 ano de uso)

Fonte: Endrigo (2023).

Apesar da tubulação de AL6XN estar em perfeito estado, devido a diferença substancial na resistência a corrosão mencionado anteriormente a maior preocupação em relação a corrosão sai da categoria de corrosão química e entra na categoria da corrosão galvânica. Tendo em vista que o AL6XN instalado na fábrica está entre dois pontos onde ainda é utilizada o material 316L, um deles uma cruzeta que faz a interligação do sistema e o outro um trocador de calor com valor agregado considerável, com isso ocorre aceleração da corrosão desses componentes de 316L.

Na Figura 10 temos as entradas dos trocadores de calor das linhas estudadas, na esquerda tem-se a linha do 316L e a direita a do AL6XN, ambos tendo um ano de uso AL6XN e 316L, respectivamente.

Figura 10: Entrada dos trocadores de calor

Fonte: Endrigo (2023).

Conforme mencionado anteriormente o trocador de calor sendo composto por 316L e usando uma tubulação de AL6XN e, como pode ser percebido essa diferença entre os dois materiais causa uma aceleração no desgaste por corrosão. Na Figura 11 pode ser visto as cruzetas seguindo a mesma formatação da figura da entrada dos trocadores de calor, na esquerda a linha de 316L e a direita AL6XN.

Figura 11: Cruzetas

Fonte: Endrigo (2023).

Pode ser observado comportamento similar ao trocador de calor porém com uma severidade maior devido a massa da cruzeta ser bem menor em relação ao trocador.

No ensaio de resistência à corrosão acelerada as médias de perca de material no período de 24h para o material AL6XN foi de 0,00075g, nesse mesmo teste o 316L apresentou média de 0,00252g. Nos testes de dobramento executados ambos os materiais tanto na solda manual quanto na solda automática apresentaram resultados

satisfatórios. Para os testes de tração obteve-se uma diferença não muito relevante (em torno de 100MPa) para a aplicação desses materiais, com o AL6XN ficando com uma média de 683MPa e o 316L com uma média de 571MPa.

CONCLUSÃO

A composição química de ambas as ligas possui diferença significativa o que impacta diretamente nos resultados obtidos nos ensaios de teste de corrosão e inspeções boroscópicas.

Atentando as particularidades do procedimento de soldagem do AL6XN, com os resultados obtidos é de fato um material excelente para as necessidades da fábrica, já que os testes mecânicos apresentam comportamentos similares entre as duas ligas e os testes de corrosão apontam uma redução de cerca de quatro vezes em relação a perda de massa da liga de AL6XN contra o aço 316L, tendo em vista que essa diferença se dá pela maior quantidade de molibdênio na liga AL6XN.

Além disso, após analisar as diferenças no processo de soldagem dos dois materiais, o AL6XN exige um cuidado especial durante a solda, incluindo a necessidade de um inserto para evitar a segregação química do molibdênio, essa observação é de suma importância para garantir a integridade da solda e sua resistência ao processo produtivo da fábrica.

Porém com os equipamentos atuais não se recomenda a utilização, já que ele aceleraria a degradação dos outros materiais na linha, fazendo com que os objetivos de reduzir a necessidade de substituição de componentes por sua utilização não aconteça.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

RIBEIRO, J. P. C. *et al.* Tecnologia metalúrgica. 1. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

GALLAGHER, M. L. An Investigation of the elevated temperature cracking susceptibility of alloy C-22 weld-metal. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Ohio, 2008.

COSTA E SILVA, A. V.; MEI, P. R. Aços e Ligas especiais. 4. ed. São Paulo: Blücher, 2021.

ENDRIGO, J. C. Estudo comparativo das ligas de aço inoxidável super austenitico AL-6XN/6MO e aço inoxidável austenico 316L, 46p. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2023

COMPARATIVE STUDY OF SUPER AUSTENITIC STAINLESS STEEL ALLOYS AL-6XN/6MO AND AUSTENITIC STAINLESS STEEL 316L

ABSTRACT

In the pharmaceutical industry there are 316L stainless steel pipes that transfer water with a certain concentration of sodium at a temperature between 80 and 90ºC, which due to the effects of corrosion are replaced annually. A test was implemented with the AL6XN alloy with the aim of extending its useful life, and, to manufacture the piping, TIG welding was used to join the AL6XN parts with the help of an insert. The welds underwent borescopic inspections and no flaws were found. Mechanical tests were carried out to verify the behavior of the alloy, and corrosion tests carried out showed approximately four times less mass lost by AL6XN compared to 316L. Due to the AL6XN piping being installed between a crosshead and a heat exchanger made up of 316L, the phenomenon known as galvanic corrosion occurs, accelerating the corrosion process of these components, not worth the investment.

Keywords: *Pharmaceuticals. Corrosion. Molybdenum. TIG.*