

EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO ISOTÉRMICO SOBRE O TAMANHO DE GRÃO, DUREZA E SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO INTERGRANULAR DE UM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO*

Ana Cecília de Carvalho¹
Paulo Sérgio Moreira²
Geraldo Lúcio de Faria³

Resumo

Nesse trabalho estudou-se o efeito de temperaturas e intervalos de tempo de tratamento isotérmico sobre a microestrutura, dureza e susceptibilidade à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico 410D. O aço foi caracterizado em seu estado de entrega e amostras representativas foram isotermicamente tratadas a 300, 600 e 900°C por diferentes intervalos de tempo. Cada amostra termicamente tratada foi caracterizada por microscopia óptica e eletrônica de varredura. Foram obtidos os tamanhos médios dos grãos ferríticos e as durezas foram medidas. A susceptibilidade à corrosão intergranular foi avaliada por meio da submissão das amostras a um ataque eletrolítico com um reativo a base de ácido oxálico. Observou-se que, mesmo no estado de entrega, o aço apresentou baixa susceptibilidade à corrosão intergranular do tipo "Step". Nas amostras termicamente tratadas a 300°C e 600°C foi observado o mesmo tipo de corrosão intergranular, porém de forma mais acentuada a 600°. As amostras submetidas ao tratamento isotérmico a 900°C apresentaram formação de uma fração de martensita após resfriamento ao ar, apresentando corrosão intergranular menos expressiva.

Palavras-chave: Sensitização, Corrosão Intergranular; Aço Inoxidável Ferrítico.

EFFECT OF TIME AND TEMPERATURE OF ISOTHERMAL HEATTREATMENT ON GRAIN SIZE, HARDNESS AND INTERGRANULAR CORROSION SUSCEPTIBILITY OF A FERRITIC STAINLESS STEEL

Abstract

This work aims to study the effects of temperature and isothermal treatment's time on the microstructure, hardness and susceptibility to intergranular corrosion of ferritic 410D stainless steel. Initially, the steel was characterized in its initial state, and then representative samples were isothermally treated at 300, 600 and 900°C in different time intervals. Each thermally treated sample was characterized by light and scanning electron microscopy to obtain the average sizes of the ferritic grains and to measure their hardness. The susceptibility to intergranular corrosion was evaluated by subjecting the samples to an electrolytic etch with oxalic acid based reagent. It was possible to observe that even in the initial state, the steel presented low susceptibility to intergranular corrosion ("Step" type). In the heat treated samples at 300°C and 600°C, the same type of intergranular corrosion was observed, but more markedly at 600°C. The samples submitted to the 900°C isothermal treatment presented the formation of a fraction of martensite after air cooling; thus, the intergranular corrosion was much less expressive.

Keywords: Sensitization; Intergranular Corrosion; Ferritic Stainless Steel.

¹ *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais e Brasil.*

² *Engenheiro Metalúrgico, MSc., Pesquisador, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais e Brasil.*

³ *Físico, Dr., Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que as perdas de material por corrosão chegam a um custo de 4% do PIB de um país industrializado. Os aços inoxidáveis são então amplamente utilizados por possuírem um teor de cromo em sua composição química que permite a formação de uma camada superficial passiva que garante a sua boa resistência a corrosão, além de possuírem propriedades mecânicas e resistência à oxidação que permitem a utilização em uma grande diversidade de meios e aplicações [1-2].

Quando trabalham em altas temperaturas, os aços inoxidáveis podem apresentar o fenômeno de sensitização. Esse fenômeno consiste na precipitação de carbeto ricos em cromo ($M_{23}C_6$) nos contornos de grão, enquanto que as regiões adjacentes se tornam empobrecidas no elemento. Uma vez pobre em cromo, há um prejuízo na formação da camada protetora, e o aço sensitizado tem sua resistência à corrosão diminuída, tornando-se susceptível à corrosão intergranular [3-4].

Em geral, os aços inoxidáveis ferríticos comerciais apresentam maiores teores de elementos intersticiais (C e N). Nessas ligas, o aquecimento em temperaturas próximas de 950°C e posterior resfriamento rápido até a temperatura ambiente não é suficiente para impedir a precipitação de carbonetos e nitretos de Cr e nem a formação de regiões pobres em Cr. Quando os teores de carbono estão entre 0,002% e 0,006%, a precipitação de carbonetos de cromo não ocorre de forma abundante. Teores de carbono e nitrogênio da ordem de 0,01% já são suficientes para produzir susceptibilidade à corrosão intergranular nos aços inoxidáveis. Cunha (2016) observou que o aço inoxidável austenítico AISI 304A, após solubilização e sensitização, apresentou significativa precipitação de carbonetos de cromo na região dos contornos de grão quando isotermicamente tratados a 700°C e 1000°C. [5-6].

Para contornar o problema da sensitização, costuma-se adicionar pequenas quantidades de elementos estabilizantes, como titânio, nióbio e tálio, ou ainda reduzir a quantidade de carbono na produção do aço. Tomari et al.(1982) afirmam que há dificuldade de o Ti combinar com o C e o N durante resfriamentos rápidos a partir de temperaturas elevadas (entre 900°C e 1000°C), [3].

Segundo as normas ASTM A 262 e ASTM A 763, as estruturas atacadas devem ser classificadas como apresentando os seguintes modos de ataque: "Step" (existem apenas desníveis entre os grãos), "Ditch" (um ou mais grãos estão completamente circundados por corrosão, mostrando a existência da sensitização) e "Dual" (há a precipitação de carbonetos ricos em cromo na região de contorno de grão, mas não é suficiente para circundar completamente os grãos) [7].

O aço inoxidável 410D é um aço de grande destaque atual no Brasil, apesar de ainda ser um aço em desenvolvimento no país, por ter uma composição relativamente simples, não ser estabilizado e ser um aço inoxidável ferrítico, ele apresenta um custo relativamente mais baixo em relação aos outros aços inoxidáveis. Sendo assim, ele tem sido considerado como uma solução de baixo custo para a substituição de aços comuns em algumas aplicações em que grandes investimentos não são justificáveis. Nesse sentido, a motivação deste trabalho se dá em função do aço 410D ter sido selecionado como candidato em potencial para construção de tubulações de vapores de água em plantas industriais fazendo concorrência a aços patináveis [8]. Uma vez que a tubulação será submetida a diferentes temperaturas por diferentes intervalos de tempo, conhecer o efeito destas variáveis na susceptibilidade à corrosão intergranular do aço em estudo é importante. Assim sendo, este é o objetivo do presente estudo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material objeto de estudo deste trabalho é o aço inoxidável ferrítico 410D, produzido pela empresa Aperam South America. A composição química do aço em estudo está apresentada na Tabela 1. Destaca-se que a quantidade de cromo presente no aço em estudo classifica-o como inoxidável. Já o teor de carbono de 0,007% atende às especificações para esse tipo de aço, que aceita no máximo 0,02%. Este teor de C é baixo em relação ao teor máximo permitido. Esse baixo teor de C, associado à elevada concentração de Cr ajudam na estabilidade da ferrita. Como há uma quantidade significativa de alumínio, pode haver formação de nitretos de alumínio, o que pode implicar em barreiras ao crescimento de grão. A adição de estabilizantes como nióbio, molibdênio e titânio não é significativa, de forma que esse aço não pode ser considerado um aço inoxidável estabilizado. A pequena adição de Mo tem como função contribuir para o aumento da tenacidade à fratura, dureza e a resistência ao impacto [9]. Em combinação com o cromo e o níquel, há o aumento da resistência à corrosão. Já o nióbio e o titânio, formam carbonetos que se precipitam nos contornos de grão. Mas em aços inoxidáveis, podem ser adicionados em proporção com o teor carbono, causando assim uma dispersão de inclusões de carbonetos, implicando no endurecimento da matriz e evitando a concentração nos contornos dos grãos. Em função dessa composição relativamente simples, o aço em estudo é considerado de baixo custo em relação aos outros aços inoxidáveis

Tabela 1. Composição química dos aços estudados (% em peso)

Elemento	S	Ti	Al	C	Mo	Nb	Co	P
Concentração	0,0005	0,001	0,002	0,007	0,008	0,015	0,016	0,023
Elemento	V	Cu	Ni	Mn	Si	Cr	N ₂ *	-
Concentração	0,028	0,03	0,329	0,588	0,603	11,43	119	-

* ppm

2.2 Procedimentos Experimentais

2.2.1 Tratamentos Isotérmicos

As amostras do aço, retiradas de uma chapa com espessura de 6mm, foram cortadas com dimensões 30mmX30mm e então submetidas a diferentes temperaturas e intervalos de tempo de tratamentos isotérmicos a 300, 600 e 900°C. Para facilitar o manuseio das amostras durante a execução dos procedimentos experimentais e a apresentação dos resultados, as amostras foram identificadas conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2. Nomenclatura das amostras em função das condições de tratamento térmico

Número da Amostra	0	1	2	3	4
Condição	Estado de Entrega	300°C – 1 hora	300°C – 24 horas	300°C – 72 horas	600°C – 10 minutos
Número da Amostra	5	6	7	8	9
Condição	600°C – 30 minutos	600°C – 1 hora	600°C – 12 horas	600°C – 24 horas	600°C – 36 horas
Número da Amostra	10	11	12	13	14
Condição	600°C – 48 horas	600°C – 72 horas	900°C – 1 hora	900°C – 24 horas	900°C – 72 horas

2.2.2 Caracterização Microestrutural

Do aço estudado, foram retiradas amostras representativas e realizadas caracterização microestrutural e mecânica do estado de entrega e após os tratamentos isotérmicos. A microestrutura foi analisada com o auxílio de um microscópio óptico LEICA DM2700M do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) do DEMET. As amostras foram embutidas a frio e preparadas metalograficamente, seguindo os procedimentos da Norma ASTM E3, 2011.

As amostras termicamente tratadas foram submetidas a procedimentos de lixamento e polimento seguindo padrões estabelecidos pela ASTM, conforme já descrito. Posteriormente elas foram submetidas à Prática W da norma ASTM A763 para avaliação da susceptibilidade à corrosão intergranular (sensitização). Seguindo orientações da norma ASTM A763, o reativo à base ácido oxálico utilizado foi preparado com 100g de ácido oxálico em 900mL de água destilada. O tempo de ataque foi padrão de 60 segundos. A fonte foi ajustada para tensão de 10 Volts. Após ocorrer o ataque, as amostras foram lavadas em água e em álcool e devidamente secas.

Foi realizado também o ataque com o reagente Vilella (2g de ácido pícrico e 5% de ácido clorídrico diluídos em álcool etílico) para melhor revelar os contornos dos grãos. Após o ataque, as imagens foram obtidas no microscópio óptico e o tamanho dos grãos foi medido pelo software LAS 4.6 Leica com sensibilidade 10. As amostras do estado de entrega, a número 6 e a número 14 foram analisadas no MEV, (Microscópio Eletrônico de Varredura) da marca Tescan e modelo VEGA3XMH no Laboratório NanoLab REDEMAT – UFOP, para evidenciar detalhes da corrosão intergranular e da camada de óxido observada na situação mais crítica de tratamento isotérmico.

2.2.3 Ensaios de Dilatometria

O aço inoxidável 410D tem em sua composição química um pequeno acréscimo de Ni que possibilita que ele seja austenitizado quando aquecido até determinada temperatura e, durante o resfriamento, forme uma microestrutura martensítica. Uma amostra representativa do aço, foi destinada a ensaios de dilatometria com o objetivo de se determinar experimentalmente as temperaturas críticas de início (Ac1) e final de austenitização (Ac3) deste aço. As análises dilatométricas foram

realizadas em um dilatômetro de têmpera LINSEIS, modelo L78 R.I.T.A. do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia  ptica (LTM) do DEMET. Foram usadas amostras cilíndricas com 3mm de diâmetro e 10 mm de comprimento. As temperaturas críticas de forma o da austenita no aquecimento foram determinadas a partir das curvas dilatométricas. Nestes experimentos, as amostras foram aquecidas à taxa de 1,0  C/s até a temperatura de 1000 C.

2.2.4 Ensaio de Dureza

Na superfície das amostras, foram realizados, no Laboratório de Ensaio Mecânicos da EM - UFOP, ensaios de dureza Brinell, com uma esfera de 2,5mm de diâmetro e carga de 187,5kgf. As medi es foram feitas em pontos afastados 5mm uns dos outros, em uma máquina de dureza universal, obtendo-se então 12 medidas para o cálculo da média e do desvio padrão. Após a obten o das imagens da microestrutura das amostras, foram feitas medi es de microdureza Vickers, em um microdur metro da marca Pantec, modelo HXD – 1000TM. Foi utilizada uma carga de 200gf com um tempo de aplica o de 5 segundos. Um total de 15 identifica es aleatórias foram executadas por amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracteriza o Microestrutural do Estado de Entrega

Na análise das microestruturas das amostras no estado de entrega observou-se uma microestrutura tipicamente ferrítica, homogênea com morfologia equiaxial, como esperado e já reportado por outros autores para este mesmo aço [10, 11]. A Figura 5.1 apresenta a microestrutura do estado de entrega atacada com o reativo Vilella e eletroliticamente com o reativo   base de ácido oxálico, que foram utilizados para evidenciar os contornos dos grãos ferríticos e a corrosão intergranular, respectivamente.

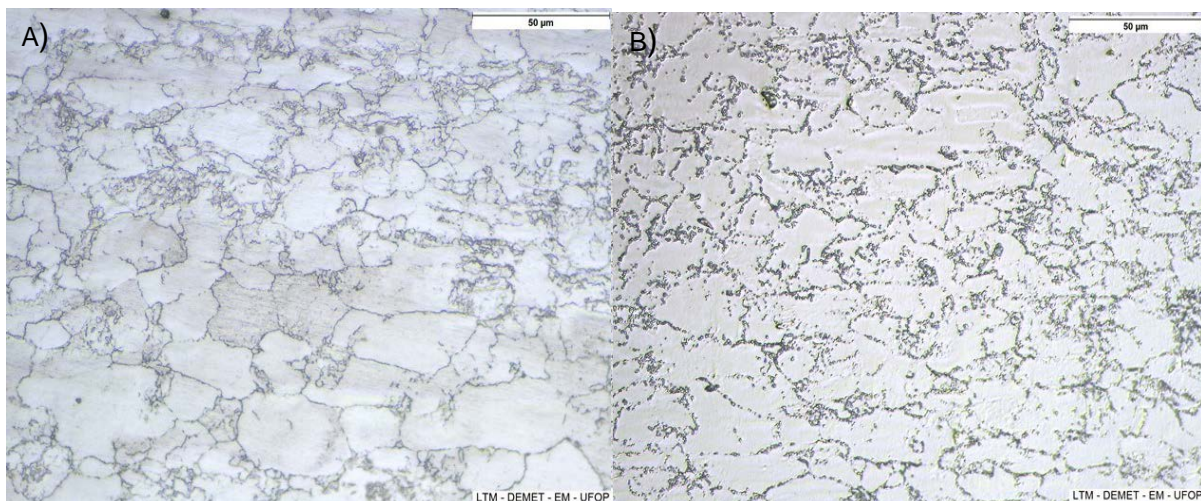


Figura 1: Microestrutura do aço no estado de entrega, 500X. (A) Ataque Vilella (B) Ataque eletrolítico   base de  cido Oxálico.

Pelas imagens obtidas com o ataque   base de ácido oxálico, observa-se o tipo de corrosão “Step” segundo a norma ASTM A763. Como os teores de Nb, Mo e Ti são baixos no aço em estudo, mesmo no estado de entrega, ele apresenta uma pequena

susceptibilidade à sensitização, como descrito por SILVA, 2010 [12], a depender das condições de processamento do material, pode ocorrer a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, deixando a vizinhança com uma segregação negativa de cromo, possibilitando a corrosão localizada. A amostra, no estado de entrega, apresentou tamanho de grão ferrítico de $(11 \pm 6)\mu\text{m}$ apresentando um número de grão ASTM entre 10 e 11, uma dureza de $(225 \pm 2,7)\text{HB}$ emicrodureza de $(241 \pm 4)\text{HV}$.

3.2 Ensaio de Dilatometria

Por meio de ensaios de dilatometria foram medidas as temperaturas críticas de transformações de fases no aquecimento. No aquecimento, determinou-se as temperaturas de início e fim de formação da austenita como sendo $\text{Ac}_1=815^\circ\text{C}$ e $\text{Ac}_3=937^\circ\text{C}$, respectivamente, para a taxa de aquecimento de 1°C/s . A Figura 9 apresenta a curva dilatométrica, onde os pontos de desvios da expansão térmica linear da liga são apontados.

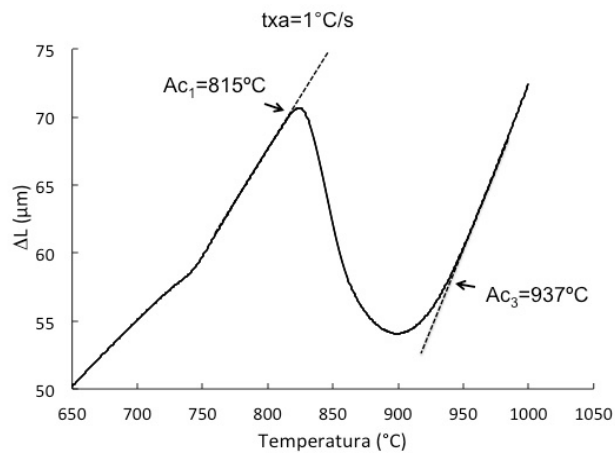


Figura 2: Variação de comprimento da amostra como uma função da temperatura para a taxa de aquecimento de 1°C/s .

Considerando este resultado de dilatometria, verifica-se que o tratamento isotérmico de 900°C foi realizado em uma região bifásica, em que o aço estava em processo de austenitização. Logo, a porção de austenita que foi formada, no resfriamento, se transformou em martensita e a ferrita remanescente, permaneceu na estrutura final.

3.3 Efeito dos Tratamentos Isotérmicos sobre a Microestrutura e a Corrosão intergranular

3.3.1 Tratamento Isotérmico a 300°C

Na temperatura de 300°C não se observou diferença significativa de corrosão intergranular em relação ao estado de entrega, pois quando os teores de carbono estão entre 0,002% e 0,006%, a precipitação de carbonetos de cromo não ocorre de forma abundante [6,10]. A microestrutura apresenta corrosão do tipo “Step”, segundo a norma ASTM A763. Ainda nessas amostras, foi medido o tamanho de grão, que também não apresentou significativa diferença em comparação ao estado de entrega. A amostra termicamente tratada por 72 horas apresentou tamanho médio de grão $(10 \pm 7)\mu\text{m}$, com um número ASTM entre 9 e 10. Desta forma, pode-se afirmar que na temperatura de 300°C , mesmo para 72 horas de tratamento, não

há crescimento expressivo de grão no aço inoxidável 410D. A amostra tratada isotermicamente a 300°C, após polimento e ataque eletrolítico apresentou as microestruturas destacadas na Figura 2.

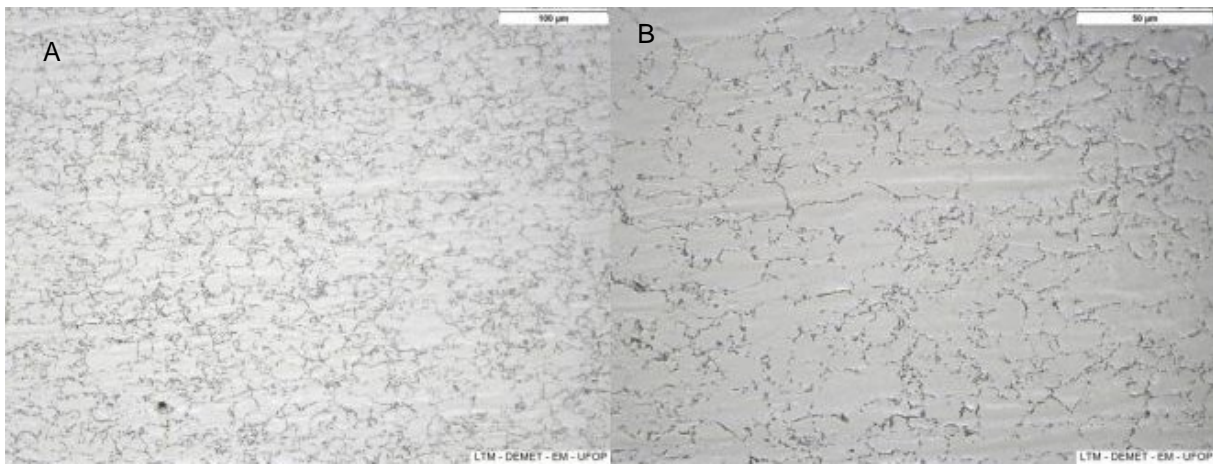


Figura 3: Microestruturas observadas após tratamentos isotérmicos C de 72 horas na temperatura de 300 °C (A) 200x. (B) 500x.

3.1.1.2 Tratamento Isotérmico a 600°

O tratamento isotérmico a 600°C durante diferentes intervalos de tempo gerou amostras com microestruturas apresentadas nas Figuras 3 e 4. Observa-se que mesmo para os menores intervalos de tempo, na temperatura de 600°C, há uma intensificação da corrosão intergranular, ainda classificada como tipo “Step”, mas a corrosão se apresenta em quase todo contorno do grão, mais significativa do que no estado de entrega e do que nos tratamentos isotérmicos a 300°C. Isto se justifica pela difusão significativa do C nas temperaturas entre 500°C e 700°C, que gera rápida precipitação de fases ricas em Cr, resultando em uma região empobrecida em Cromo nas suas vizinhanças [10, 13]. Em relação ao tamanho de grão, não há crescimento significativo. Os tamanhos de grão são muito próximos ao do estado de entrega, para 72 horas de tratamento isotérmico o tamanho de grão foi de $(10 \pm 8)\mu\text{m}$.

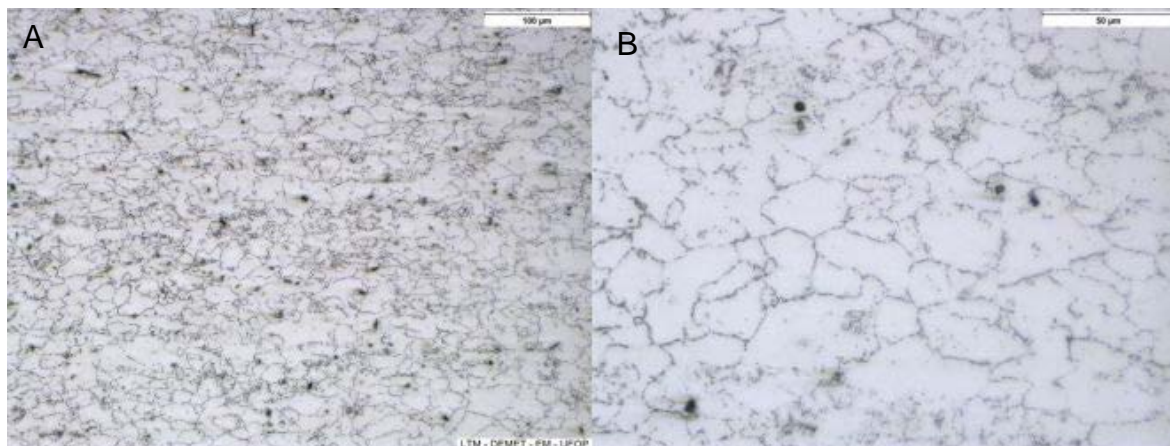


Figura 4: Microestruturas observadas após tratamentos isotérmicos de 1 hora na temperatura de 600°C. (A) 200x. (B) 500x.

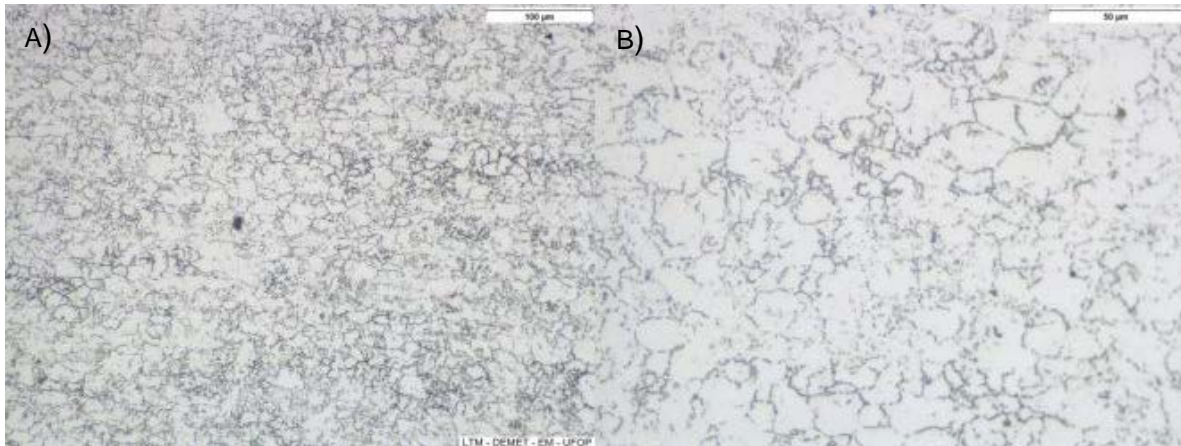


Figura 5: Microestruturas observadas após tratamentos isotérmicos de 72 horas na temperatura de 600°C. (A) 200x. (B) 500x.

Conclui-se que os tempos mais longos de tratamento térmico apresentam uma maior intensificação da corrosão intergranular, do tipo “Step” e “Dual”, já que alguns grãos estão completamente circundados por corrosão. Conclui-se então que na temperatura de 600°C, há uma significativa susceptibilidade à precipitação de carbonetos nos contornos dos grãos, justificada por um aumento de sensitização nessa temperatura de tratamento térmico [14]. A Figura 5 apresenta a microestrutura observada no MEV, após tratamento isotérmico de 1 hora, para confirmar que as cavidades observadas são características de corrosão intergranular.

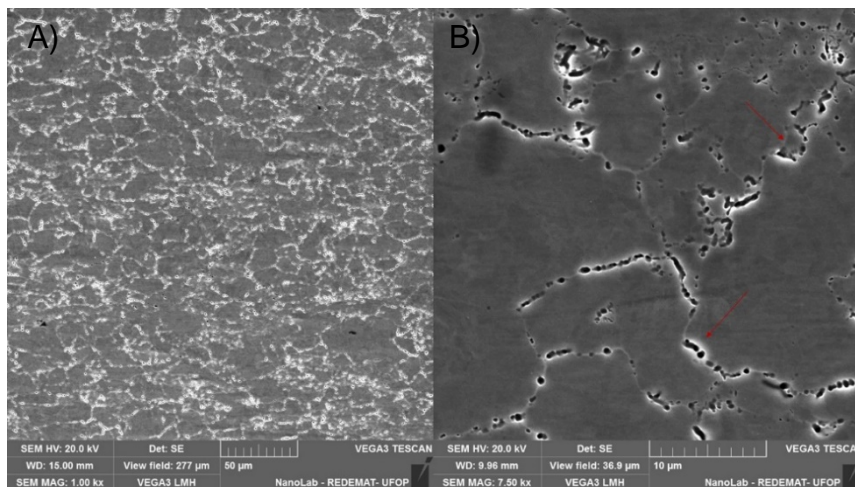


Figura 6: Microestruturas observadas no MEV após tratamento isotérmico de 1 hora na temperatura de 600°C. (A) 1000x. (B) 7500x.

3.1.1.3 Tratamento Isotérmico a 900 °C

As amostras termicamente tratadas a 900°C apresentaram transformação martensítica parcial durante o resfriamento ao ar, e devido a isso, apresentaram pouca corrosão intergranular, que não pôde ser vista nas imagens obtidas por microscopia óptica, apenas nas imagens geradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 6 apresenta imagens obtidas em MEV da amostra submetida a tratamento isotérmico de 900°C durante 72 horas. Pode-se ver mais claramente grãos de ferrita em uma matriz de martensita e algumas marcas de corrosão intergranular preferencialmente na martensita.

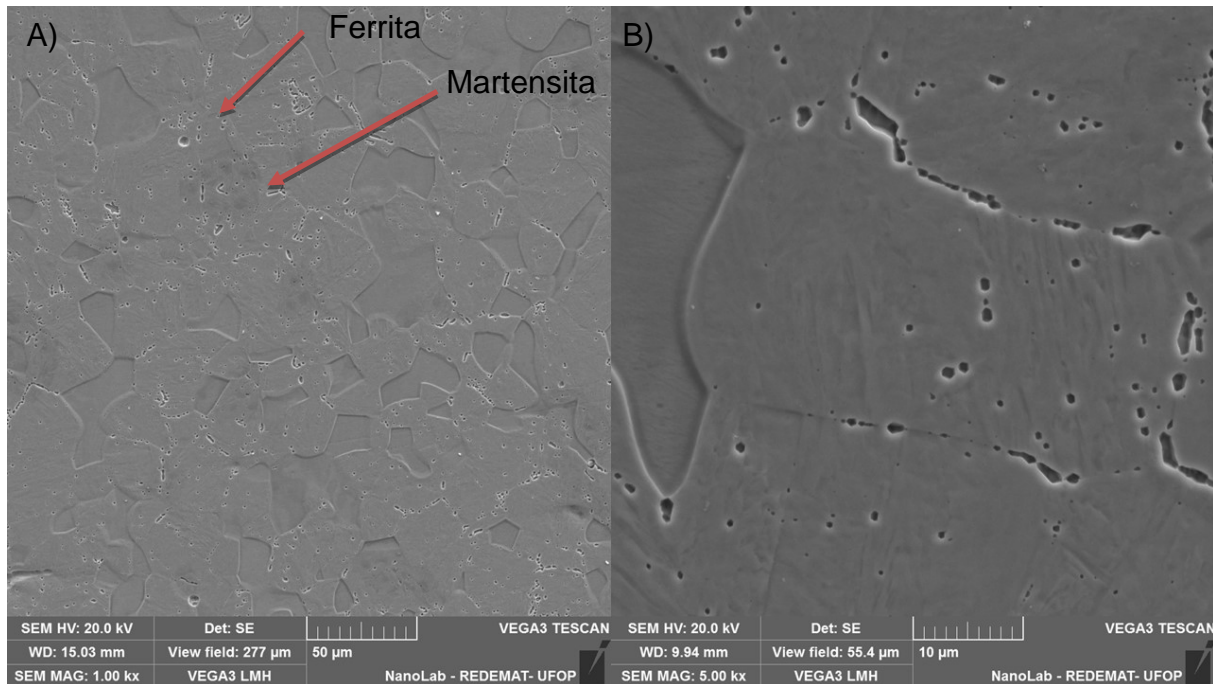


Figura 7: Microestrutura obtida após tratamento isotérmico de 72 horas na temperatura de 900°C, MEV (A) 1000x, (B) 5000x.

A diminuição significativa da intensidade de corrosão intergranular nas amostras tratadas a 900°C pode ser justificada pela formação de uma fração de martensita. À temperatura de 900° a estrutura do aço 410D está parcialmente austenitizada, como pode ser observado na Figura 2. Assim sendo, durante o tratamento isotérmico, onde coexistem austenita e ferrita, supõe-se que haja uma significativa partição do carbono de forma que os grãos de austenita fiquem significativamente mais ricos em carbono do que os grãos ferríticos. Como a solubilidade do C na austenita é muito maior do que na ferrita, há menor precipitação de carbonetos, mantendo o Cr em solução sólida e diminuindo a ocorrência da sensitização. No resfriamento, essa austenita com maior concentração de carbono transforma-se em martensita, resultando em uma estrutura bifásica (ferrita e martensita). Quando as amostras foram submetidas ao ataque eletrolítico à base de ácido oxálico, a estrutura martensítica, que é mais rica em carbono, passa a ser mais susceptível à corrosão, enquanto a estrutura ferrítica, empobrecida em carbono, não apresentou evidências de corrosão intergranular.

Ainda nas amostras isotermicamente tratadas a 900°C foi observada uma camada superficial grosseira de óxidos complexos. Essa camada, foi analisada em um MEV com a utilização de detector de elétrons retroespalhados e EDS. A Figura 7 apresenta a imagem dessa camada observada no MEV. A Figura 8 apresenta o resultado da análise química qualitativa feita por EDS.

Pode-se observar que na extremidade da amostra, há um enriquecimento de Fe, o que indica a formação preferencial de óxidos de ferro. Observa-se ainda uma camada intermediária, onde a concentração de Cr se destaca, indicando que pode ter ocorrido formação intensa de óxidos de cromo e ferro, o que está de acordo com resultados de outros autores [14,15]. Ainda nesta área, pode-se verificar a oxidação preferencial nos contornos de grão. A terceira região consiste na matriz do aço, onde as concentrações dos elementos se estabilizam. A camada mais interna de óxido, em que há formação preferencial de óxidos de Cr e Fe se

apresentou muito aderente, funcionando como uma espécie de lubrificante mecânico durante o desbaste e lixamento metalográfico, fator que dificultou a sua remoção nessas etapas. Ainda se observou que a camada rica em ferro é a mais externa e é menos aderente ao aço do que a camada mais interna, rica em cromo.

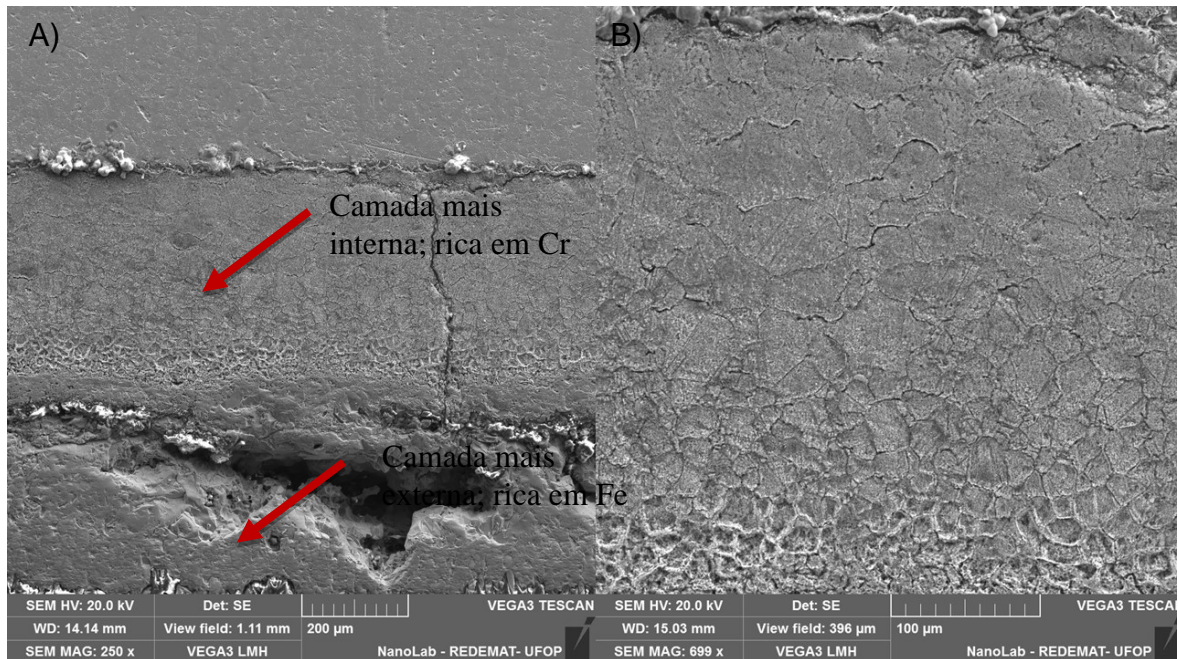


Figura 8: Detalhes da camada de óxido formada na amostra com tratamento isotérmico durante 72 horas a 900°C, MEV (A) 250x (B) 700x.

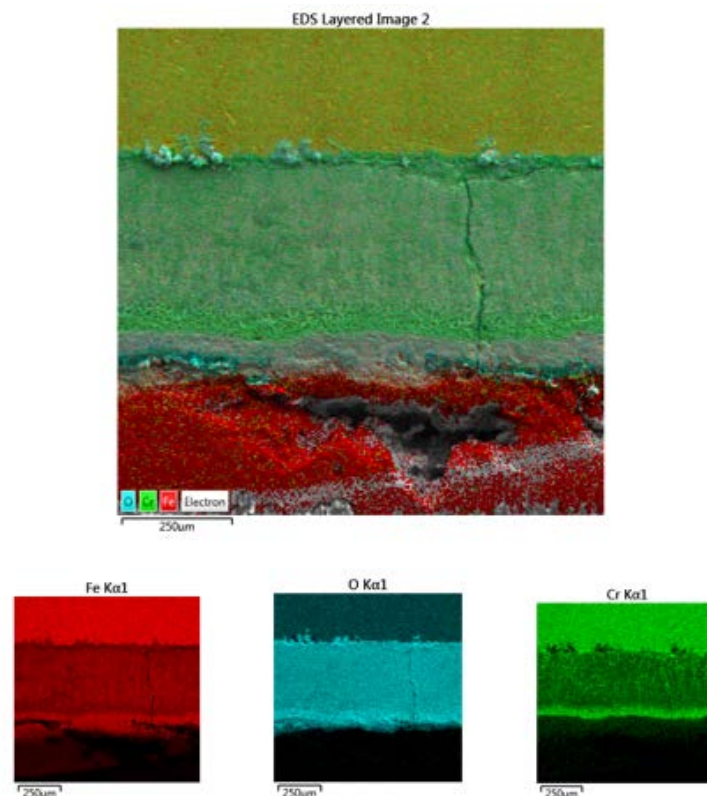


Figura 9: Análise EDS realizado na camada de óxido formada superficialmente.

2.2.4 Efeitos dos Tratamentos Isotérmicos Sobre o Tamanho de Grão Ferrítico e Dureza

Os tamanhos de grão das amostras termicamente tratadas não apresentaram significativa diferença em relação ao estado de entrega. Conclui-se então que não há crescimento significativo de grão ferrítico em função das condições de tratamento isotérmico. A Figura 10 apresenta um comparativo dos tamanhos de grão, com média e desvio padrão. Não foi medido o tamanho de grão para as amostras de 900°C, pois essas apresentaram transformação martensítica.

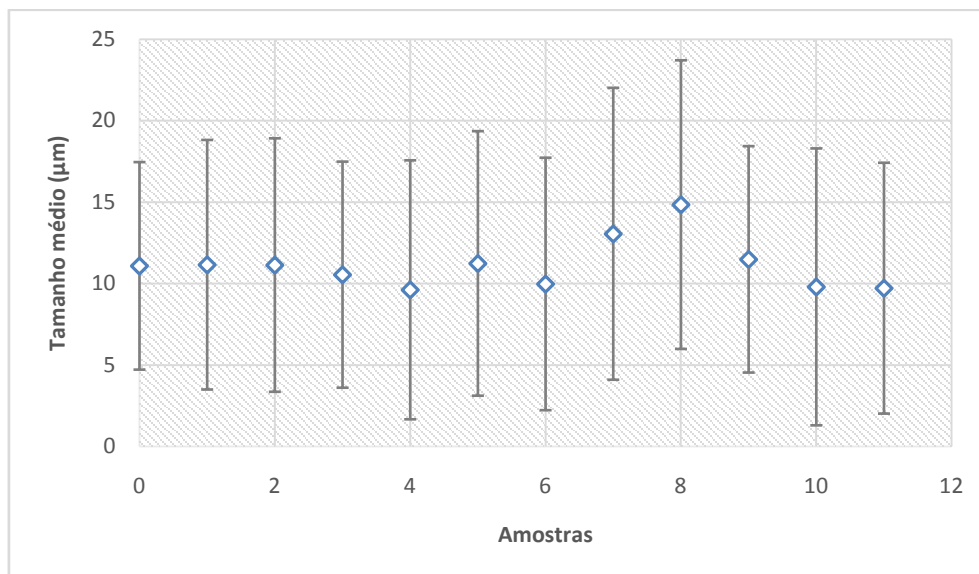


Figura 10: Gráfico de Tamanho médio de grão pelo número da amostra referenciado na Tabela 2.

A Dureza Brinell foi medida em todas as amostras. A Figura 11 apresenta os resultados obtidos. Percebeu-se que amostras termicamente tratadas a 600°C apresentaram uma leve diminuição no valor médio da dureza em relação ao estado de entrega. Provavelmente essa diminuição da dureza se deu por dois motivos que são a diminuição da densidade de descontinuidades estruturais presentes nas amostras em estudo, e, com a precipitação de carbonetos de Cr, estaria ocorrendo uma diminuição do efeito de endurecimento por solução sólida. Já as amostras tratadas a 900°C apresentam um comportamento diferente. Percebe-se um aumento de dureza. Isso deve ter ocorrido, provavelmente, devido a formação de uma fração de martensita, ou seja, uma fase com maior dureza. O desvio médio das medições é bem pequeno, mostrando que o aço em estudo é bem homogêneo.

Nas amostras termicamente tratadas também foram medidas a Microdureza Vickers, e o resultado está apresentado na Figura 12. Observa-se que não há variação significativa na microdureza até a amostra 12. As 3 últimas amostras (tratadas a 900°C) apresentam um aumento em relação às demais. Como já discutido, esse aumento é justificado pela transformação martensítica. Como as amostras apresentaram uma matriz de martensita e grãos de ferrita estão aleatoriamente distribuídos nessa matriz, o desvio médio de microdureza também se apresenta maior, uma vez que o valor medido depende do campo atingido pelo penetrador, podendo ser, aleatoriamente ferrita, ou martensita.

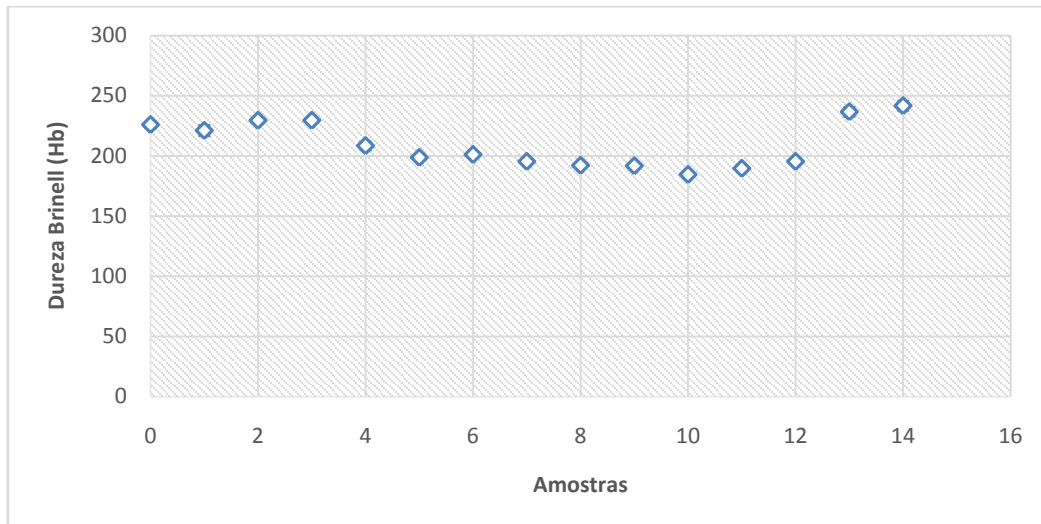


Figura 11: Gráfico de Dureza Brinell pelo número da amostra referenciado na Tabela 2.

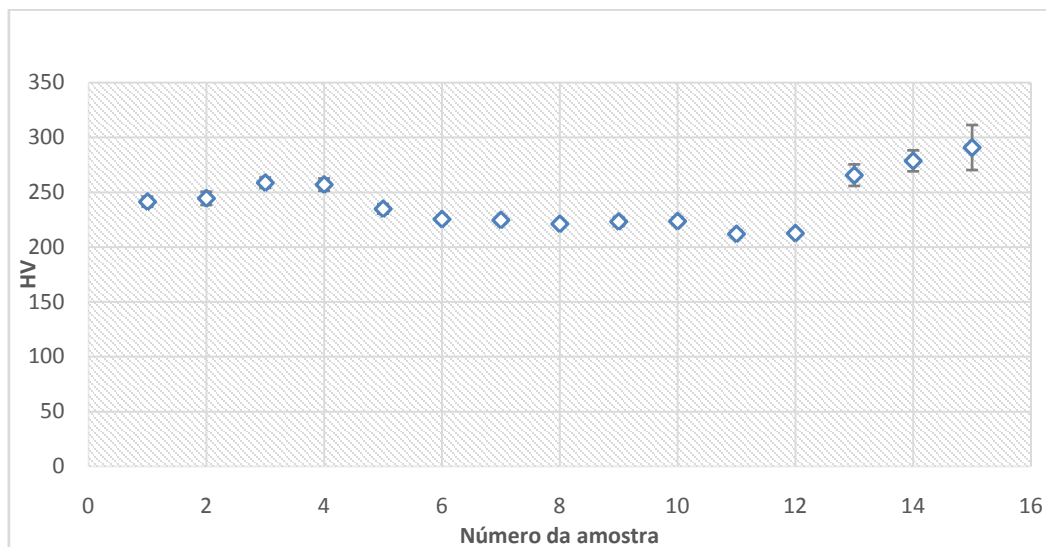


Figura 12: Gráfico de Microdureza Vickers pelo número da amostra referenciado na Tabela 2.

3 CONCLUSÕES

O aço estudado é um aço inoxidável ferrítico com baixo teor de carbono, há também a presença de estabilizantes em baixo teor, como molibdênio e titânio, mas por as concentrações serem baixas, ele não pode ser considerado um aço inoxidável estabilizado. O aço apresenta uma microestrutura tipicamente ferrítica, homogênea e com morfologia equiaxial. O tamanho de grão médio medido no estado de entrega foi de $(11 \pm 6)\mu\text{m}$.

No estado de entrega o aço apresentou uma pequena susceptibilidade à sensitização, observou-se o tipo de corrosão “Step” segundo a norma ASTM A763. Isso se deve aos baixos teores de Mo e Ti presentes no aço em estudo.

As temperaturas de 300°C e 600°C e os intervalos de tempo dos tratamentos isotérmicos realizados não apresentaram significativa influência no tamanho de grão ferrítico do aço 410D.

Foi observada uma pequena diminuição de dureza do material para as condições de tratamento isotérmico a 600°C. Esta pequena diferença pode ser justificada pela

diminuição da densidade de descontinuidades estruturais no material e pela precipitação de carbonetos de Cr, que gera uma diminuição do efeito de endurecimento por solução sólida. Já nas amostras termicamente tratadas à 900°C observou-se um aumento da dureza, sendo ele explicado pela formação de uma matriz martensítica.

A corrosão intergranular se tornou mais intensa para a temperatura de tratamento de 600°C, mas continuou do tipo “Step”. As amostras que experimentaram transformação martensítica (tratadas a 900°C) apresentaram baixa susceptibilidade à corrosão intergranular, pois durante o tratamento isotérmico, quando coexistem austenita e ferrita, há uma maior dissolução do carbono nos grãos de austenita, deixando os grãos ferríticos pobres em carbono. Como a solubilidade na austenita é muito maior do que na ferrita, há menor precipitação de carbonetos, diminuindo a sensibilização. Os sinais de corrosão intergranular observados foram na matriz de martensita, mais rica em carbono.

Conclui-se então que o aço inoxidável ferrítico 410 D, apesar das observações de algum tipo de corrosão intergranular em todas as faixas de temperaturas, apresenta baixa susceptibilidade à corrosão intergranular, pois não foram observados, para as condições estudadas, a corrosão intergranular do tipo “Ditch”, considerada inaceitável para aços inoxidáveis ferríticos, segundo a norma ASTM A763.

Agradecimentos

À Fundação Gorceix pela oportunidade e pelo auxílio financeiro concedido na forma de bolsa de iniciação científica, à Aperam South America, pelo material doado e ao CNPq pela bolsa de produtividade concedida a um dos autores.

REFERÊNCIAS

- 1 –GEMELLI, E. Corrosão de Materiais Metálicos. 3. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2006, 183p.
- 2 –COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. ed, São Paulo, Editora Blucher, 2008.672p.)
- 3 –LIMA, A. S.; ABREU, H. F. Aspectos da Corrosão Intergranular dos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 304L, AISI 316L, AISI 321 e AISI 347, Usados em Refinarias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 22.; CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 6.; 2002, Salvador: COTEQ, 2002.).
- 4 –SEDRIKS, A. J. Corrosion of Stainless Steels. 2ª Edição, New York, USA John Willey & Sons: Intergranular Corrosion, 1996, 437p.
- 5 –DEMO, J.J. Structure, Constitution and General Characteristics of Wrought Ferritic Stainless Steels. ASTM, p.1-15, 1977.
- 6 – CIHAL, V.; STEFEC, R. On the development of the electrochemicalpotentiokinetic method. *ElectrochimicaActa*. V.46, n24-25, p 3867-3877. 2001.
- 7 – ASTM. A763 93: Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Ferritic Stainless Steels. West Conshohocken, USA: ASTM, 1999. 11p.8 - SILVA, Isabela Leão Amaral da. "Efeito da Temperatura na Microestrutura e Oxidação de um Aço Inoxidável Superduplex". Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes,2010.
- 8 – SANTOS, D.A.de S., RIBEIRO, M.R., FARIA, G.L, QUEIROZ, R.R.U., Influência da Temperatura de Trabalho na Microestrutura e no Comportamento Mecânico do Aço Patinável USISAC 350. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT, Natal – RN, 2016.
- 9–SILVA, André Luiz V. da Costa; Mei, Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais. Villares Metals, São Paulo, 2010.

- 10 – CUNHA, E.C., FARIA, G.L., GODEFROID, L.B., FARIA, G.A. Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular em Aços Inoxidáveis Aplicados em Chapas Expandidas. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT, Natal – RN, 2016.
- 11 – FARIA, G.L., GODEFROID, L.B., ALVES, J.O., Estudo Comparativo de Propriedades Mecânicas de Chapas Expandidas de Aços C-Mn e Inoxidáveis. Tecnol. Metal. Mater.Miner, São Paulo, v.13, n.3, p. 216-223. Jul/set. 2016.
- 12– SILVA, Isabela Leão Amaral da. "Efeito da Temperatura na Microestrutura e Oxidação de um Aço Inoxidável Superduplex". Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes,2010.
- 13– SENRA-GIRALDO, Carlos Augusto. "Resistência à Corrosão Intergranular do Aço Inoxidável Ferrítico UNSS S43000: Avaliação por Método de Reativação Eletroquímica, efeito de Tratamento Isotérmico e Mecanismo de Sensentização." Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- 14– SSINA, Specialty Steel Industry of North America. Acesso em 16 de junho de 2017 Disponível em: <http://www.ssina.com/corrosion/igc.html>.
- 15 – SERRA, E.C, BRANDIM, A.de S, OLIVEIRA, G.B., SALGADO, M. de F., Oxidação de Aço Inoxidável Ferrítico AISI 409 em Altas Temperaturas em Atmosfera de Ar Sintético. Universidade Estadual do Maranhão, Caxias – MA. 2014.
- 16 – CARNEIRO, J.F, Estudo da Oxidação de Ligas Fe-Cr a Altas Temperaturas. [Dissertação de Mestrado] Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT – UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2011.
- 17– TOMARI, H., FUJIWARA. K., SHIMOGORI, K., FUKUZUKA, T., KANDA, M. Intergranular stress corrosion cracking of 13%Cr and 18%Cr ferritic stainless steels in high temperature high purity water. Corrosion. v38, n.5, p. 283-294. 1982.
- 18– SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais. Villares Metals, São Paulo, 2010.
- 19– DEMO, J.J. Structure, Constitution and General Characteristics of Wrought Ferritic Stainless Steels. ASTM, p.1-15, 1977.