



**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“Avaliação Comportamental do Inoxidável Ferrítico 410D Submetido a Ensaios de Tração a Quente e Impacto Charpy”**

Ana Cecília de Carvalho

Ouro Preto, Junho de 2019

Ana Cecília de Carvalho

**“Avaliação Comportamental do Aço Inoxidável Ferrítico 410D Submetido a Ensaios de Tração a Quente e Impacto Charpy”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia Metalúrgica.

**Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria.**

Junho de 2019.



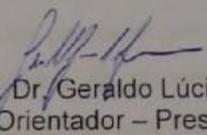
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

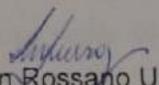


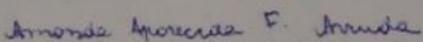
### ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

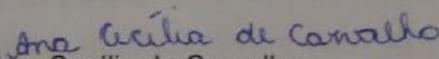
Aos 27 dias do mês de junho de 2019, às 13:30 horas, no Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Ótica (LTM), no prédio dos Laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Campus, foi realizada a defesa de monografia pela aluna **Ana Cecília de Carvalho** sendo a comissão examinadora constituída pelo Professor Geraldo Lúcio de Faria (Orientador), UFOP, pelo Professor Rhelman Rossano Urzêdo Queiroz, IFMG-OP e pela Engenheira Amanda Aparecida de Fátima Arruda, REDEMAT. A aluna apresentou a monografia intitulada "**Avaliação Comportamental do Aço Inoxidável Ferrítico 410D Submetido a Ensaios de Tração a Quente e Impacto Charpy**". A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo à aluna um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 27 de junho de 2019.

  
Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria  
Orientador – Presidente

  
Prof. Dr. Rhelman Rossano Urzêdo Queiroz  
Membro

  
Engenheira Amanda Aparecida de Fátima Arruda  
Membro

  
Ana Cecília de Carvalho  
Aluno

## RESUMO

O aço inoxidável ferrítico 410D (UNS S41003) é um aço relativamente novo e ainda em desenvolvimento no mercado Brasileiro. Ele tem sido posicionado como um candidato a substituir aços baixo carbono comuns e aços patináveis em algumas aplicações onde existam exigências no que diz respeito à resistência do material à oxidação e à corrosão. Entretanto, ainda existem algumas lacunas de conhecimento a respeito do seu comportamento mecânico que permitam avaliar a viabilidade de sua aplicação em condições agressivas de trabalho, como por exemplo em temperaturas relativamente elevadas, de forma que se garanta resistência mecânica, mas também a tenacidade do material. Partes estruturais de caldeiras, tubulações para condução de vapores e gases quentes, entre outros, são exemplos em potencial para aplicação do aço 410D. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou o comportamento do referido aço quando submetido a ensaios de tração a quente, nas temperaturas de 300°C e 600°, comparando-se os resultados obtidos com o seu desempenho à temperatura ambiente, e quando submetido a ensaios de impacto Charpy, de forma a construir a curva energia absorvida - temperatura. Concluiu-se que o aço inoxidável 410D é susceptível ao fenômeno de envelhecimento dinâmico na temperatura de 300°C, tendo sua capacidade de deformação plástica significativamente diminuída. A 600°C observou-se uma diminuição de 45% no seu limite de escoamento e um aumento de 7% no alongamento total em relação à temperatura ambiente. Concluiu-se também que o aço em estudo tem sua transição dúctil – frágil entre as temperaturas -65°C e 0°C, sendo a fratura completamente frágil em temperaturas inferiores a -65°C e completamente dúctil acima de 0°C.

Palavras-Chave: Aço inoxidável ferrítico; Ensaio de Tração; Ensaio de Impacto Charpy; Temperaturas elevadas.

## **ABSTRACT**

The 410D ferritic stainless steel is a relatively new steel and in development on Brazilian Market. It has been put as a candidate to replace common low carbon steels and weathering steel in some applications, where there are some requirements related to the materials oxidation and corrosion resistance. However, there still is a lack of knowledge related to its mechanical behavior, which allows the assessment of its application's feasibility in aggressive work conditions, such as in relatively high temperatures, in order to ensure mechanical strength, but also the toughness of the material. Furnace structural parts, piping for conducting hot gases and vapors, among others, are potential examples for 410D steel applications. In this context, the present work has assessed the behavior of the aforementioned steel when it is submitted to hot tensile tests, at 300°C and 600°C, by comparing the obtained results to its performance at room temperature and when it is submitted to Charpy Impact test, in order to construct the absorbed energy – temperature curve. It was concluded that the 410D stainless steel is susceptible to the dynamic aging phenomenon when strained at 300°C. In this condition, its total strain is significantly affected and decreased. At 600°C it was noticed a decrease of 45% on its yield strength and an increase on its total strain when compared to the room temperature condition. It was also concluded that the 410D stainless steel has a ductile - fragile transition between - 65 ° C and 0 ° C, therefore the fracture is completely fragile at temperatures below -65°C and completely ductile above 0°C.

**Key-words:** Ferritic Stainless Steel; Tensile Test, Charpy Impact Test; High Temperatures.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	6
2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	12
2.1	2.1 Materiais .....	12
2.2	Procedimentos Experimentais.....	12
2.2.1	Caracterização do Estado de Entrega .....	12
2.2.2	Ensaio de Tração .....	13
2.2.3	Ensaio de Impacto .....	15
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	17
3.1	Caracterização Microestrutural Do Estado de Entrega.....	17
3.2	Ensaio de Tração.....	17
3.3	Ensaio de Impacto Charpy .....	23
4	CONCLUSÕES.....	27
5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	28
6	AGRADECIMENTOS.....	29
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	30

## 1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável ferrítico 410D (UNS S41003) é um aço de grande destaque atual no Brasil, embora seja fabricado em território nacional a um tempo relativamente curto. O aço em estudo possui um custo relativamente baixo no mercado em relação aos outros aços inoxidáveis, devido à composição química relativamente simples. Sendo assim, ele foi introduzido no mercado Brasileiro com o objetivo de expandir o comércio de aplicação dos aços inoxidáveis e é, também, considerado uma alternativa de baixo custo aos aços carbonos comuns para algumas aplicações em que não se justifica utilizar aços de alto valor agregado, mas se exige bom desempenho em ambientes oxidantes e corrosivos, como, por exemplo, na indústria agrícola, em especial na fabricação de álcool e açúcar, em que há exigências de resistência mecânica e à corrosão (SOARES E FARIA, 2014; FARIA et.al, 2016; VILELA, 2016).

Tendo em vista que o aço 410D ainda está em desenvolvimento no Brasil, tanto no que diz respeito a aplicações quanto ao processo de fabricação, pode-se afirmar que foram feitos poucos estudos quanto à caracterização do seu comportamento quando submetido a esforços mecânicos, meios corrosivos, oxidação em temperatura elevadas, de forma a propor novas aplicações ao aço. Algumas frentes de estudo têm sido desenvolvidas recentemente, considerando a relevância e a atualidade do tema. Visando uma aplicação relativamente simples para esse aço, sem a necessidade de resistência a grandes esforços mecânicos, Faria et.al. (2016) estudaram algumas propriedades mecânicas de chapas expandidas do aço inoxidável ferrítico 410D e compararam ao aço carbono ABNT 1010 e ao aço inoxidável 444A. Percebeu-se, então, que nos ensaios de tração, o aço 410D apresentou desempenho mecânico semelhante ao de chapas expandidas fabricadas com o aço carbono ABNT 1010, sendo que o aço 444A apresentou maior alongamento e maior carga suportada. Observou-se ainda que, para os três aços estudados, mecanismo de fratura foi de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades, tipicamente apresentado em fraturas dúcteis. As figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, a curva força – alongamento, uma vez que os ensaios foram feitos para chapas expandidas e por possuir geometria complexa para transformação dessa tensão em tração, foi apresentado em função da força, proveniente do resultado do ensaio de tração e a análise de superfície de fratura no MEV para o aço 410D, evidenciando as microcavidades presentes no material, característica de fratura dúctil.

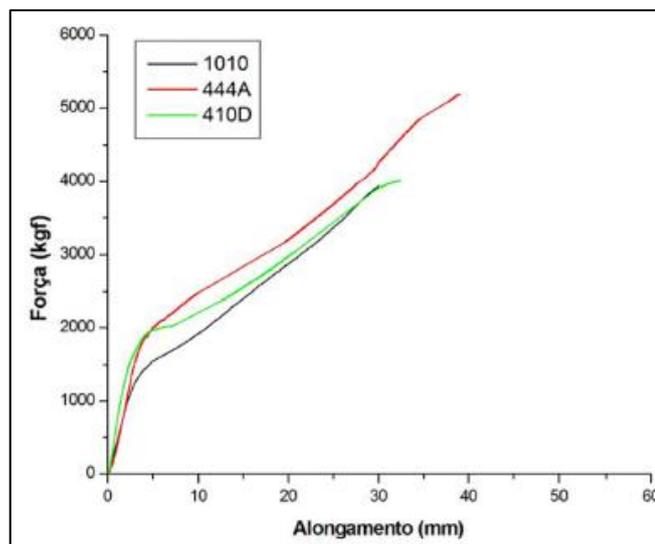


Figura 1 - Curva força versus alongamento resultante do ensaio de tração. Comparativo entre o aço carbono ABNT 1010, o aço inoxidável 444A e o aço inoxidável ferrítico 410D (FARIA, 2016).

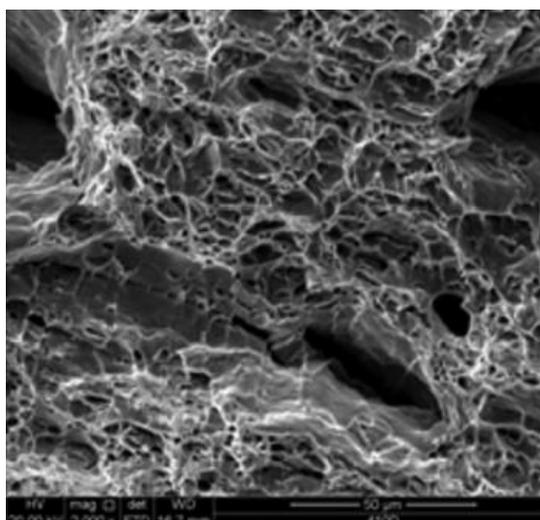


Figura 2 - Fractografias ilustrando a presença de microcavidades no aço 410D submetido a ensaios de tração à temperatura ambiente (Adaptado de FARIA, 2016).

No sentido de avaliar o comportamento do aço inoxidável ferrítico em aplicações mais complexas como, por exemplo condições em que a soldagem seria necessária, Carvalho (2018) estudou a susceptibilidade à corrosão intergranular e o crescimento de grão quando submetido a altas temperaturas por diferentes intervalos de tempo. Os tratamentos isotérmicos foram realizados a 300°C, 600°C e 900°C. Nas temperaturas de 300°C e 600°C, observou-se intensificação da corrosão intergranular, mas ainda se apresentando como do tipo “Step”, mesma classificação encontrada para estado de entrega, segundo a norma ASTM A763. Pode-se afirmar, então, que o aço apresenta o fenômeno de sensibilização em temperatura ambiente,

uma vez que na rota de fabricação desse aço, ele é submetido a recozimento por grande intervalo de tempo, e intensifica-se com o aumento da temperatura de tratamento. Para essas duas temperaturas de ensaio, percebeu-se ainda, que não há crescimento de grão significativo em relação ao estado de entrega. A Figura 3 apresenta as microestruturas do aço inoxidável 410D, de forma a destacar a corrosão intergranular, para as condições de estado de entrega e termicamente tratadas a 300°C e 600°C no intervalo de 72 horas, analisadas no microscópio óptico.

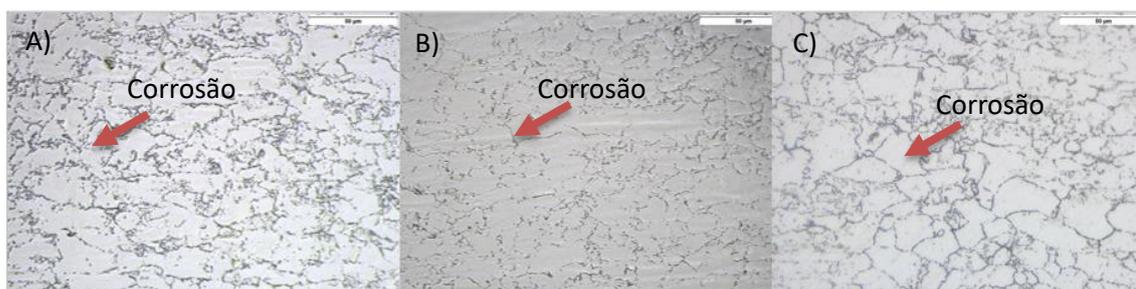


Figura 3 – Microestrutura do aço inoxidável ferrítico 410D. 500x. (a) Estado de entrega; (b) 300°C por 72 horas; (c) 600°C por 72 horas (Adaptado de CARVALHO, 2018).

Além disso, observou-se que as amostras tratadas isotermicamente a 900°C sofrem transformação martensítica parcial durante o resfriamento ao ar e apresentaram baixa corrosão intergranular. Após o resfriamento as amostras apresentaram estrutura bifásica, composta de uma matriz de martensita com grãos de ferrita. A Figura 4 apresenta imagens obtidas em MEV da amostra submetida a tratamento isotérmico de 900°C por 72 horas, preparadas metalograficamente e atacadas com o reativo ácido oxálico para revelar a microestrutura. Verificou-se, ainda, que a corrosão intergranular aconteceu preferencialmente na martensita e isso se dá porque a 900°C a estrutura do aço 410D se austenitiza parcialmente e coexistem austenita e ferrita. Como a solubilidade do carbono é maior na austenita, há uma significativa partição do carbono e os grãos austeníticos ficam mais ricos em carbono do que os grãos de ferrita. No resfriamento, essa austenita mais saturada em carbono se transforma em martensita e passa a ser mais susceptível à corrosão, sendo que a estrutura ferrítica, mais empobrecida em carbono, não apresentou evidências de corrosão intergranular.

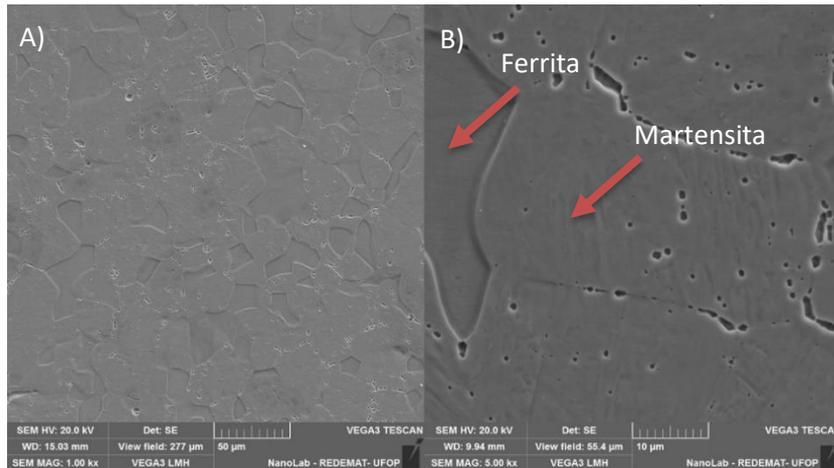


Figura 4 - Microestrutura obtida após tratamento isotérmico de 72 horas na temperatura de 900°C, MEV (A) 1000x, (B) 5000x (Adaptado de CARVALHO, 2018).

Ainda nas amostras isotermicamente tratadas a 900°C, Carvalho (2018) observou que as amostras apresentavam uma camada superficial grosseira de óxidos complexos. Analisou-se essa camada em um MEV com a utilização de detector de elétrons retroespalhados e EDS. As Figuras 5 e 6 apresentam a imagem dessa camada observada no MEV e o resultado da análise química qualitativa feita por EDS, respectivamente. Constatou-se que na extremidade da amostra há formação preferencial de óxidos de ferro e na seção intermediária, em que a concentração de Cr se destaca, indica que pode ter ocorrido formação intensa de óxidos de cromo e ferro. Nessa área, percebeu-se também 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 e funcionou como uma espécie de lubrificante mecânico durante a preparação metalográfica.

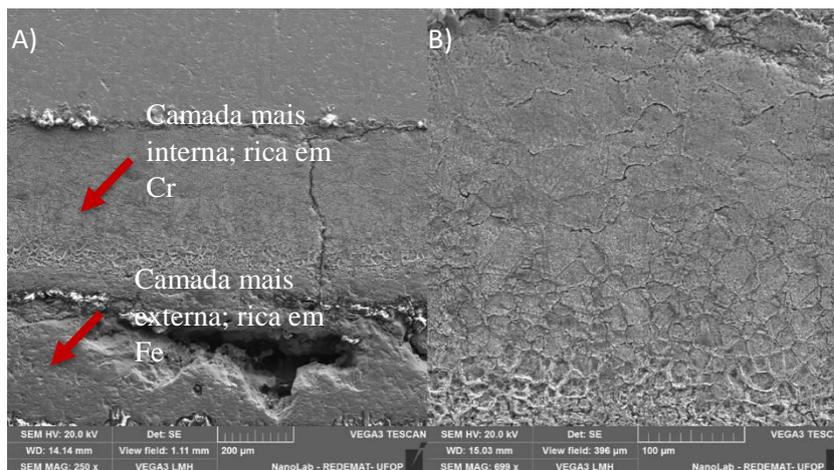


Figura 5 - Detalhes da camada de óxido formada na amostra com tratamento isotérmico durante 72 horas a 900°C, MEV (A) 250x (B) 700x (Adaptado de CARVALHO, 2018).

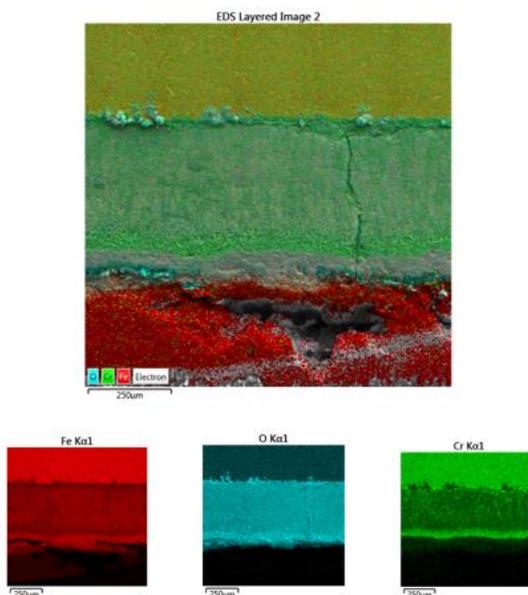


Figura 6 – Análise química qualitativa (EDS) realizada na camada de óxidos formada superficialmente no aço 410D após tratamento isotérmico a 900°C durante 72h (CARVALHO, 2018).

Como possibilidade de aplicação desse aço em altas temperaturas por longos períodos de tempo, Arruda (2018) avaliou a camada de óxidos formada na superfície do aço 410D. Foram feitos ensaios de oxidação a 900°C e 1000°C para diferentes intervalos de tempo e em duas condições, colocando a amostra no forno sobre um suporte de aço carbono e sobre a superfície refratária do forno. Concluiu-se, então, que nas temperaturas ensaiadas houve influência do tempo no crescimento da camada de óxidos sobre a superfície do material, sendo maior e mais aderente o filme quanto maior o tempo de residência. Observou-se, ainda, que a utilização ou não do suporte de aço carbono apresenta grande influência na oxidação do aço em estudo. O aço

carbono, material menos nobre que um aço inoxidável, oxidou-se preferencialmente, de forma a proteger as amostras. Sendo assim, as amostras que foram oxidadas sobre esse suporte apresentaram uma camada de óxidos menor e menos aderente à superfície do metal, quando comparadas às amostras oxidadas sobre o suporte refratário

Tendo como característica desse aço, a boa resistência à corrosão, uma outra possibilidade de aplicação seria em tubulações para passagem de vapor de água em indústrias químicas, em substituição aos aços patináveis, que têm baixo custo de implantação, mas vida útil relativamente curta. O aumento da temperatura nessas tubulações pode levar a uma diminuição da resistência mecânica e da ductilidade do aço, podendo promover até mesmo o rompimento prematuro das estruturas. Nesse sentido, a motivação desse trabalho se dá em avaliar a influência da temperatura sobre a resistência mecânica, ductilidade e tenacidade do aço inoxidável 410D, propriedades importantes para finalidades em que sejam exigidos esforços mecânicos (DIETER, 1994; SENRA, 2006; SILVA, 2007). Sendo assim, o objetivo deste estudo é gerar resultados experimentais que caracterizem o desempenho em tração a quente e em impacto desse aço e que contribuam para a avaliação de viabilidade técnica de utilização desse aço em aplicações que envolvam temperaturas acima da temperatura ambiente.

## 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. As amostras utilizadas foram provenientes de uma chapa com espessura de 6mm laminada à quente, recozida e laminada à frio. A composição química do aço em estudo está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável ferrítico 410D (% 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 <sub>2</sub> *	-
Concentração	0,028	0,03	0,329	0,588	0,603	11,43	119	-

\*p.p.m. – partes por milhão

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 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. Em combinação com o cromo e o níquel, há o aumento da resistência à corrosão.

### 2.2 Procedimentos Experimentais

#### 2.2.1 Caracterização do Estado de Entrega

Amostras representativas, do aço em estudo, foram retiradas e realizadas caracterização microestrutural do estado de entrega. A microestrutura foi analisada com o auxílio de um

microscópio óptico LEICA DM2700M do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) do DEMET. Para a caracterização microestrutural, as amostras foram cortadas com dimensões 30mmX30mm na espessura original da chapa que foi 6mm e após embutidas a frio, tiveram sua superfície preparada metalograficamente de acordo com os procedimentos da norma ASTM E3, 2011. Fez-se o uso de suspensão aquosa de alumina de 1µm, pasta de diamante de 1µm e pasta de diamante de 0,25µm na etapa de polimento. O ataque utilizado foi o eletrolítico com o reativo ácido oxálico por 1 minuto (ácido oxálico diluído em água com concentração de 10%).

### 2.2.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial em um corpo de prova padronizado em uma máquina universal de ensaios até que ele se rompa. Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do IFMG-OP seguindo as recomendações da norma ASTM E8M. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios TIME GROUP, modelo WDW-200, com um forno de resistência elétrica acoplado, monitorado por dois termopares, estando um posicionado na câmara do forno e o outro encostado no corpo de prova. Para o controle dos parâmetros de ensaios foi utilizado o software WinWDC. Os parâmetros utilizados durante os ensaios estão descritos na Tabela 2. As Figuras 7 e 8 apresentam fotografias da montagem utilizada nos experimentos (GARCIA, 2000).

Os ensaios foram realizados em triplicata para cada uma das temperaturas escolhidas. As temperaturas de ensaio foram 22°C, 300°C e 600°C com tempo de encharque de 15 minutos. A taxa de deformação utilizada foi de  $10^{-3}s^{-1}$ . Essas temperaturas de ensaio foram escolhidas para avaliar a influência da temperatura no comportamento em tração. Sendo assim, realizou-se ensaios à temperatura ambiente (22°C), como referência, e as outras temperaturas foram escolhidas de forma que o material não sofresse austenitização. Além disso, estas são temperaturas típicas para aplicações diversas em caldeiraria, condução de vapores e gases quentes.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados dos ensaios de tração.

Ensaio de Tração a quente	
Temperaturas	Ambiente (22°C), 300°C e 600°C
Taxa de Deformação	$10^{-3}s^{-1}$
Tempo de encharque	15 minutos
Taxa de Aquecimento do forno	40°C/minuto



Figura 7 - Fotografia do forno resistivo acoplado à máquina universal de ensaios

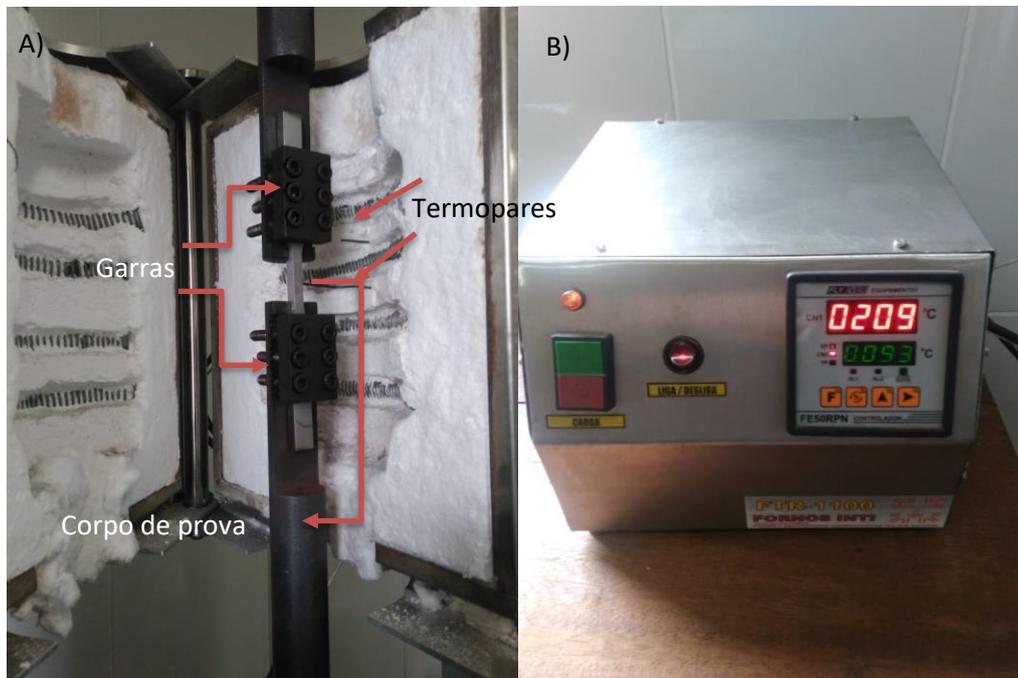


Figura 8 - (a) Forno refratário acoplado à máquina de ensaios. (b) controlador dos parâmetros térmicos da máquina de tração

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram usinados de acordo com a geometria padrão e as dimensões recomendadas pela norma ASTM E8M, como mostrado na Figura 9. As cabeças dos corpos de prova foram confeccionadas com maior comprimento do que o descrito no padrão da norma, com o intuito de que as garras da máquina não ficassem expostas às temperaturas elevadas. Essa alteração não afeta em nada a representatividade dos ensaios uma vez que a região útil e os raios de concordância seguem os padrões exigidos.

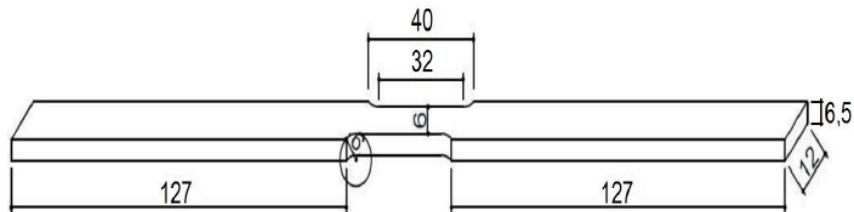


Figura 9 - Figura esquemática ilustrando as dimensões dos corpos de prova utilizado nos ensaios de tração (dimensões em mm).

Após a realização dos ensaios, foram calculadas algumas propriedades mecânicas do material, sendo elas, limite de escoamento, limite de resistência, redução de área e deformação total. O forno que foi acoplado à máquina não permitia uso de extensômetro. Sendo assim, a deformação total foi calculada unindo-se as partes fraturadas de cada corpo de prova e medindo-se o comprimento final da região útil. De forma semelhante, calculou-se a redução de área com o auxílio de um paquímetro. Para o limite de escoamento e o limite de resistência, foram feitos gráficos do tipo tensão x deformação de engenharia. De acordo com a norma ASTM E8M, o limite de escoamento foi calculado de forma a usar o ponto de interseção da curva de ensaio com um segmento de reta, paralelo à região elástica da curva, descolado a 0,2% da origem. Já para o limite de resistência, usou-se o valor de máxima tensão como critério.

### 2.2.3 Ensaio de Impacto

Foram realizados Ensaio de Impacto do tipo Charpy em escala reduzida utilizando-se a máquina para Impacto *Charpy* TIME GROUP, modelo JB-300A1/C do Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto. A máquina usada para o ensaio está apresentada na Figura 10.

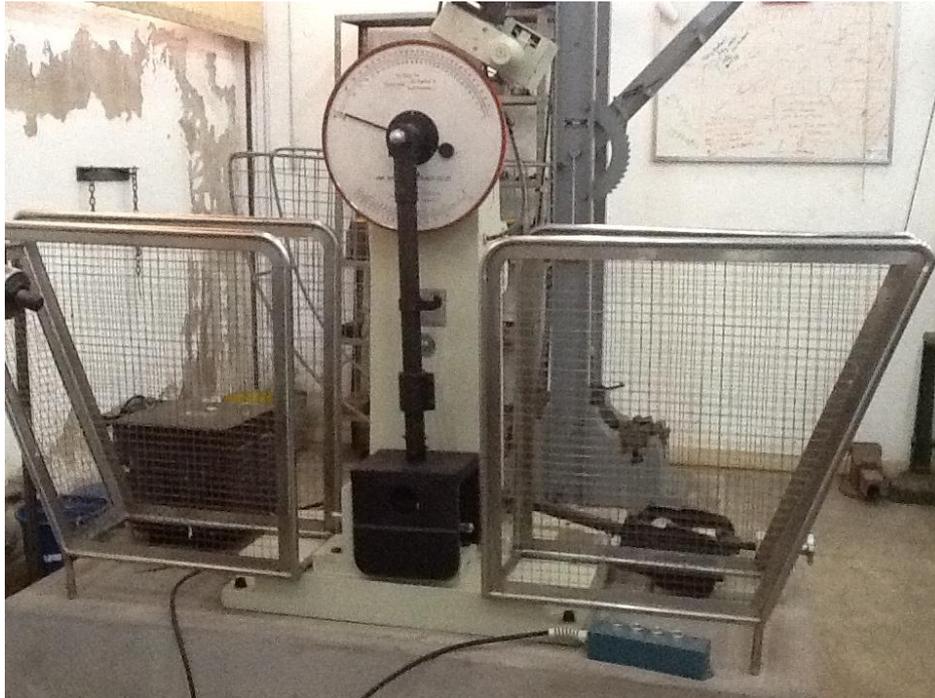


Figura 10 - Máquina para Impacto Charpy do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFOP.

Os ensaios foram realizados para as temperaturas de  $-80^{\circ}\text{C}$ ,  $-65^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $24^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$  com finalidade de obter a curva de transição dúctil-frágil e para cada temperatura, o ensaio foi realizado em triplicata de forma a obter valores de energia absorvida mais representativos. Os corpos de prova utilizados foram confeccionados segundo padrões *sub-size* da norma ASTM E23 com as dimensões  $55 \times 10 \text{ mm}$  e na espessura original da chapa, que é de  $6 \text{ mm}$ . A Figura 11 apresenta o desenho esquemático do corpo de prova com o entalhe.

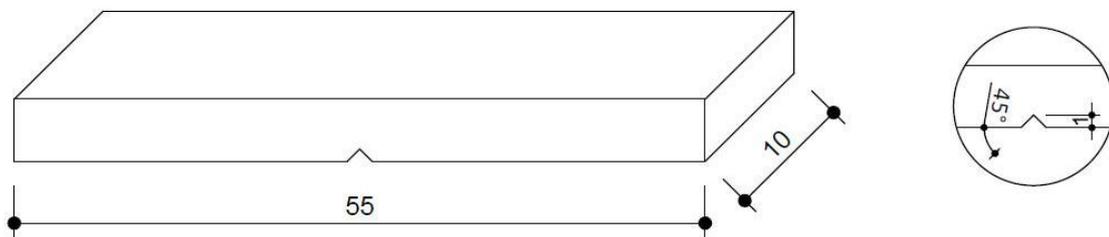


Figura 11 – Desenho esquemático do corpo de prova subsize usado nos ensaios.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização 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 já reportado por outros autores e de forma coerente com a rota de processamento na fabricação desse aço. A Figura 12 apresenta a microestrutura do estado de entrega atacadas com o reativo Vilella para evidenciar os contornos de grão (CUNHA et.al., 2016; FARIA et.al., 2006).

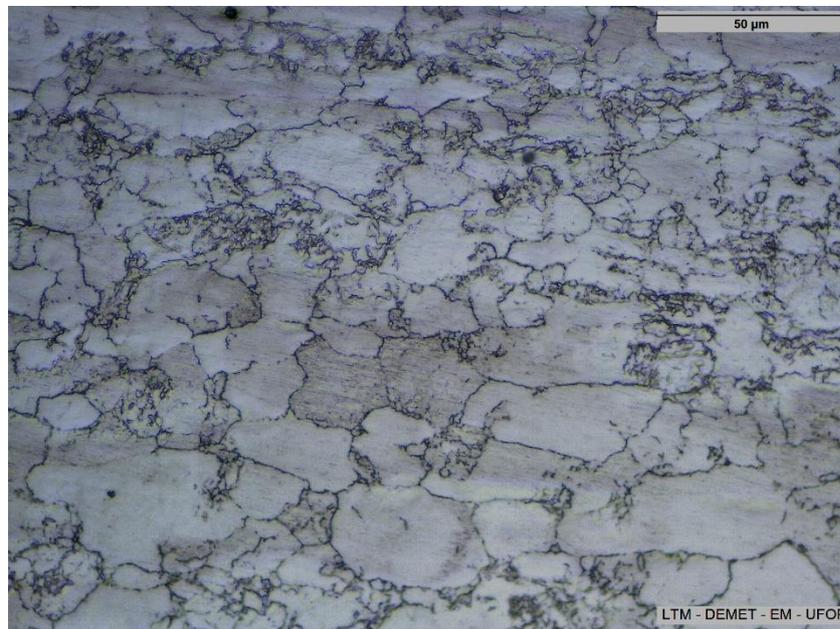


Figura 12 - Microestrutura do aço inoxidável ferrítico 410D no estado de entrega – MO – Reativo Vilella.

#### 3.2 Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas determinadas nos ensaios de tração são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do Aço Inoxidável 410D submetido a ensaios de tração.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de resistência (Mpa)</b>	<b>Redução de área (%)</b>	<b>Deformação total (%)</b>
22	463 ± 6	552 ± 32	66 ± 2	33,5 ± 0,3
300	413 ± 7	451 ± 5	65 ± 4,6	26,2 ± 0,4
600	256 ± 1	258 ± 1	76 ± 2	40,83 ± 0,5
Temperatura Ambiente (dados fornecidos pelo catálogo do fabricante) (APERAM)	Mínimo especificado: 275  Típico: 400	Mínimo especificado: 455  Típico: 490	-	-

Verifica-se que o aço em estudo, à temperatura ambiente, atende às especificações do aço inoxidável ferrítico da classe 410D segundo o catálogo da empresa Aperam South America, conforme apresentado na Tabela 3. Pode-se afirmar que há uma diminuição das propriedades mecânicas, limite de escoamento e limite de resistência, com o aumento da temperatura nos ensaios de tração. Nas temperaturas de 300°C e 600°C houve uma diminuição de 11% e 45%, respectivamente, no limite de escoamento do material, em relação ao seu comportamento à temperatura ambiente. Os valores encontrados, tanto para os limites de escoamento quanto para os limites de resistência se apresentaram significativamente maiores aos encontrados por Ribeiro (2013) ao estudar o aço patinável USI-SAC-350 também nas temperaturas de 300°C e 600°C. Esse resultado é relevante e favorável ao aço 410D, pois o aço patinável USI-SAC-350 é um possível concorrente em diversas aplicações.

Esse resultado obtido é consistente com os dados obtidos por Fujita et. al (2003) quando estudou aços inoxidáveis ferríticos em temperaturas elevadas. Espera-se que ao aumentar a temperatura de ensaio, haja aumento na deformação total, porém esse aumento não foi observado a 300°C. Uma hipótese para essa queda é que ao realizar ensaios de tração a 300°C, o material em estudo tenha sofrido envelhecimento dinâmico, o que explicaria a diminuição do alongamento total no material. Calculando-se a razão elástica para as três condições citadas acima, têm-se 0,83, 0,91 e 0,99 para 22°C, 300°C e 600°C respectivamente. Sabe-se que quanto mais próximo de 1 é esse número, menor a capacidade de encruamento e menor a região de deformação uniforme.

Espera-se, então, observar essa diminuição de alongamento uniforme nas curvas tensão – deformação que serão apresentadas a seguir.

Com o aumento da temperatura para 300°C e 600°C houve uma diminuição de 18% e 53%, respectivamente, no limite de resistência do material, em relação ao seu comportamento à temperatura ambiente. A Figura 13 apresenta exemplos das curvas de tensão-deformação que foram obtidas nos ensaios de tração realizados no material. Observa-se que a 600°C há um aumento expressivo da ductilidade dada pelo aumento da deformação do corpo de prova, porém constata-se uma diminuição significativa da região de deformação uniforme, sendo assim, um maior alongamento total do corpo de prova não é necessariamente positivo. Em baixos níveis de deformação, são nucleadas microcavidades e essas crescem e coalescem por uma extensão de deformação maior do que o observado nas outras condições. Tem-se que, também para a temperatura de 600°C uma redução do limite de escoamento e de resistência, ao se comparar com o material na temperatura ambiente, como já comentado anteriormente. Para aços inoxidáveis ferríticos, sabe-se que abaixo de 550°C a resistência mecânica é obtida por meio de mecanismos de endurecimento por precipitação e solução sólida, acima dessa temperatura, o mecanismo de endurecimento mais expressivo é por precipitação. Para que se aumente a resistência mecânica de aços inoxidáveis ferríticos em temperaturas elevadas, deveria-se aumentar os teores de cromo, molibdênio, silício e alumínio e adicionar maiores quantidades de titânio e nióbio de forma a favorecer a precipitação de carbonetos, porém, nessa situação, o aço se enquadraria em outra especificação e seu custo de fabricação aumentaria significativamente (GARCIA, 2000; FARIA, et.al., 2006).

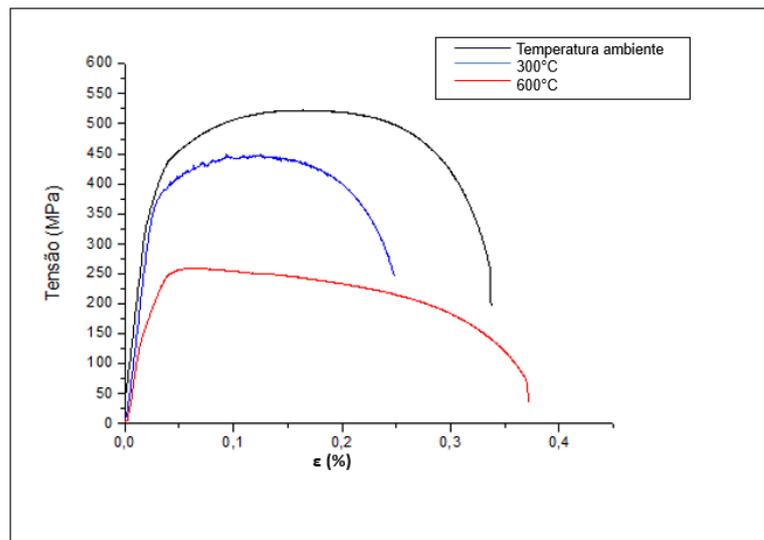


Figura 13 - Curvas Tensão-Deformação do Aço Inoxidável 410D ensaiado em diferentes temperaturas.

Ao se realizar o ensaio de tração a 300°C no aço inoxidável 410D, apresentado em destaque na Figura 14, confirmou-se a ocorrência do fenômeno de envelhecimento dinâmico no material, conforme esperado pela diminuição da deformação total já discutida acima. Esse fenômeno se dá por ancoramento de discordâncias por átomos de soluto durante a deformação plástica e acarreta uma diminuição na ductilidade do material. Dentre algumas características típicas desse fenômeno, pode-se destacar o aumento da capacidade de encruamento com a temperatura e o escoamento plástico descontínuo, que é o efeito de Portevin Le Chatelier, caracterizado por apresentar serrilhados na curva tensão x deformação (QUEIROZ, 2013; BAIRD, 1972). Alguns autores (FARIA, et.al., 2006) já haviam constatado envelhecimento dinâmico nessa classe de aço em temperaturas próximas de 300°C.

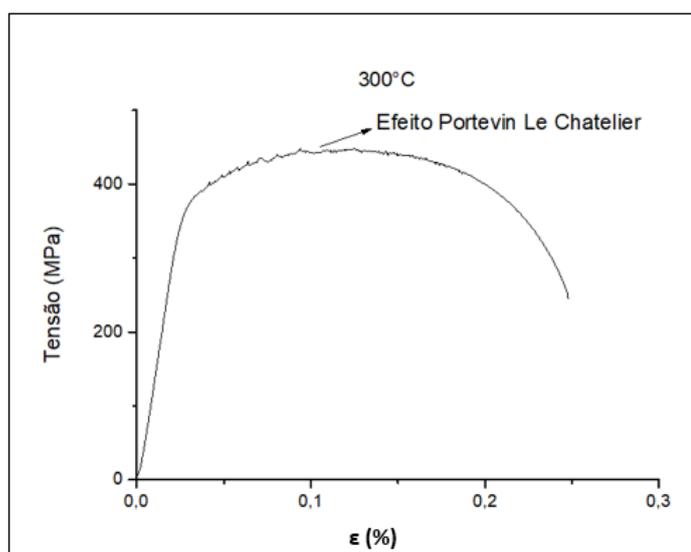


Figura 14 - Gráfico Tensão - Deformação Aço Inoxidável 410D a 300°C.

Para as três temperaturas, os dados de tensão e deformação de engenharia, da região de deformação plástica uniforme da curva, foram convertidos para valores de tensão ( $\sigma_r$ ) e deformação ( $\epsilon_r$ ) reais. Em seguida, a equação de Hollomon (Equação 1) foi ajustada de forma não-linear aos dados (Figura 15) e encontrou-se os valores, apresentados na Tabela 4, do expoente de encruamento ( $n$ ), do coeficiente de resistência plástica ( $k$ ) e do indicador estatístico de ajuste ( $R^2$ ) para cada temperatura de ensaio. Tais parâmetros são de extrema relevância na caracterização do comportamento desses materiais em processos que envolvam a sua deformação plástica, como por exemplo, conformação mecânica. O expoente de encruamento ( $n$ ) é uma medida da capacidade de um metal endurecer durante uma deformação plástica. Quanto maior o seu valor, mais o material poderá ser deformado na região de deformação uniforme com incremento significativo de tensões.

$$\sigma_r = k \cdot \epsilon_r^n \quad (1)$$

Os valores encontrados para o aço estudado apresentam uma queda significativa no coeficiente de resistência com o aumento da temperatura. À temperatura ambiente, o resultado obtido de coeficiente de resistência se apresenta significativamente maior do que o  $k$  do aço inoxidável ferrítico 430, que foi estudado por Sener (2017) e apresentou valor de 759,5 MPa. Já o coeficiente de encruamento decresce com o aumento da temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, menor o valor de  $n$  e menos o material se deforma na região de deformação uniforme, o que é visto na Figura 15, uma vez que a 600°C existem poucos pontos entre o limite

de escoamento e limite de resistência, aumentando a dispersão do ajuste à equação. A diminuição desse expoente com a temperatura é esperada por Kumar, et. al (2017).

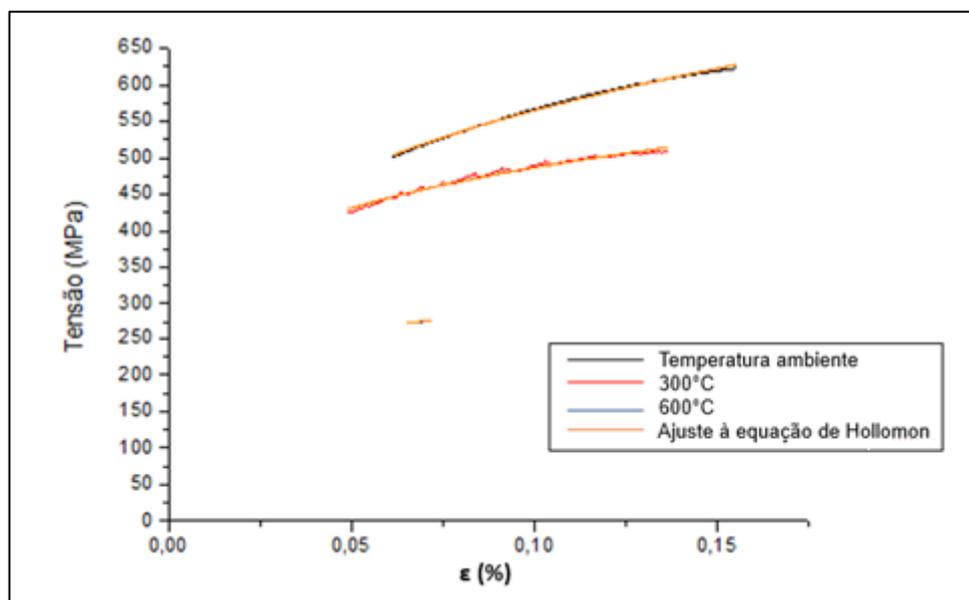


Figura 15 - Ajuste à equação de Hollomon para as três temperaturas de ensaio.

Tabela 4 - Valores médios dos coeficientes de resistência e de encruamento e de ajuste para as três temperaturas de ensaio.

Temperatura (°C)	k	n	R <sup>2</sup>
Ambiente (22°C)	1035 ± 121	0,26 ± 0,02	0,993 ± 0,004
300	732 ± 22	0,17 ± 0,02	0,983 ± 0,003
600	346 ± 1	0,0867 ± 0,0001	0,886 ± 0,008

Foram realizadas, também, análises fractográficas, no MEV, das amostras submetidas ao ensaio de tração nas três condições apresentadas e observou-se que o mecanismo de fratura foi de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades, tipicamente percebido em fraturas dúcteis, o que foi confirmado por Faria et.al. (2016). As fractografias estão apresentadas na Figura 16. Observa-se, também, que a 600°C as microcavidades se apresentam maiores que a 300°C, o que justifica o maior alongamento durante o ensaio para a temperatura de 600°C, destacado na Tabela 2. A amostra tracionada à temperatura ambiente apresenta delaminações no sentido de laminação da chapa. Esse fenômeno ocorre porque o material possui regiões de

fragilidade nesse sentido e, como forma de promover alívio dessas tensões na etapa de deformação não uniforme, trincas secundárias são formadas.

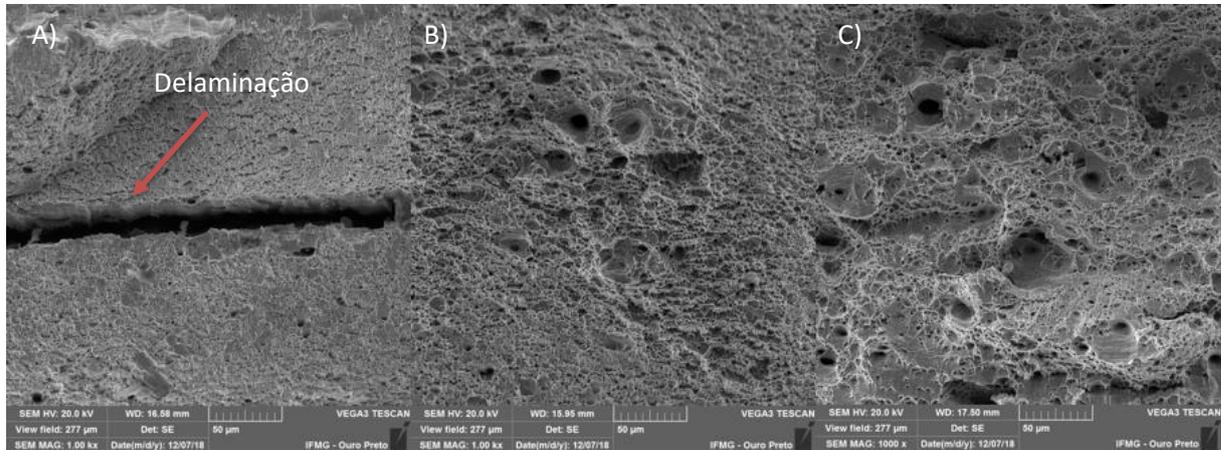


Figura 16 - Fractografias ilustrando a presença de microcavidades. 1000x. (a) 22°C, (b) 300°C, (c) 600°C.

### 3.3 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy permitiu a obtenção das energias absorvidas para cada temperatura e por meio desses resultados foi possível traçar o gráfico de energia absorvida versus temperatura de ensaio e verificar a faixa de temperatura de transição dúctil – frágil do aço inoxidável 410D. A Tabela 5 apresenta os valores médios obtidos no ensaio para cada temperatura e a Figura 17, o gráfico de transição dúctil – frágil.

Tabela 5 – Valores de energia absorvida obtidos no ensaio de impacto Charpy.

Temperatura (°C)	Energia Absorvida (J)
-80	6 ± 1
-65	14 ± 2
-50	62 ± 8
-20	77 ± 2
0	78 ± 7
24	75 ± 3
150	68 ± 2
300	64
600	51 ± 1

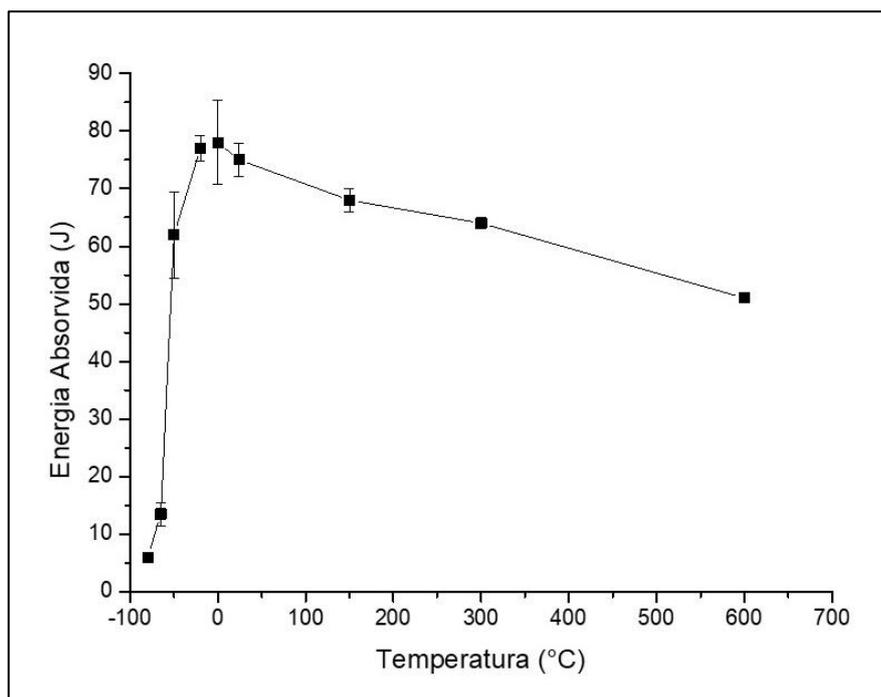


Figura 17 – Energia absorvida em função da temperatura de ensaio de impacto Charpy para o aço inoxidável ferrítico 410D.

Com base nos resultados acima, pode-se afirmar que a transição dúctil – frágil acontece entre as temperaturas de -65°C e -50°C. Essa transição é marcada pela mudança de comportamento do material, em que deixa de apresentar mecanismo de fratura frágil e passa a manifestar comportamento de fratura completamente dúctil, sendo que, ao apresentar esse

comportamento, o material tem maior capacidade de absorver energia antes de fraturar. Ao estudar o aço patinável USI-SAC-350, Ribeiro (2013) encontrou valores muito próximos de temperatura de transição ao encontrado para o aço inoxidável 410D, o que mostra que o aço em estudo é um substituto possível ao aço patinável. Além disso, esse resultado é consistente com o resultado obtido por Hibino (2011) em seu estudo sobre o comportamento em impacto do aço inoxidável ferrítico UNS S41003, cuja temperatura de transição dúctil-frágil encontrada foi entre  $-50^{\circ}\text{C}$  e  $-20^{\circ}\text{C}$ , apresentando comportamento de fratura completamente dúctil acima de  $0^{\circ}\text{C}$ . Observou-se, também, que entre  $150^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$  a energia absorvida diminui consideravelmente. Isso se dá pelo envelhecimento dinâmico que o metal sofre, como já mostrado nos resultados do ensaio de tração a quente. A partir de  $600^{\circ}\text{C}$  a queda da energia absorvida se deve ao envelhecimento por deformação sofrido pelo material.

A Figura 18 apresenta corpos de prova que foram ensaiados a  $600^{\circ}\text{C}$ . Pode-se notar que, após os ensaios, formou-se uma camada azulada de óxidos que recobre todo corpo de prova, o que caracteriza o fenômeno de fragilização ao azul. Esse fenômeno se deve ao envelhecimento por deformação e no material é criado um estado de tensões, que gera uma diminuição na resistência ao impacto, como comprovado na Figura 17. Essa redução na resistência ao impacto se justifica, porque, a partir dessa temperatura, alguns elementos presentes na composição química do aço que se precipitam em forma de compostos nos contornos de grão e interagem com as discordâncias e desestabilizam a estrutura do material (DIETER, 1994).



Figura 18 - Corpos de prova ensaiados a  $600^{\circ}\text{C}$  apresentando o fenômeno de fragilização azul.

Após o ensaio de impacto, foram realizadas, também, análises das superfícies de fratura no MEV, de forma a comprovar os diferentes mecanismos de fratura nos corpos de prova em função das diferentes temperaturas de ensaio. As Figuras 19 e 20 apresentam as fractografias para as temperaturas de  $-80^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $24^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente),  $300^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$ . Observa-se que a  $-80^{\circ}\text{C}$  e a  $-50^{\circ}\text{C}$ , a superfície da fratura se apresenta com aspecto mais plano e com a presença de facetas de clivagem, caracterizando o mecanismo de fratura como completamente frágil. Já na temperatura ambiente ( $24^{\circ}\text{C}$ ), é possível perceber diferenças na superfície de fratura, pois não apresenta mais planos de clivagens e há presença de dimples, característica de fratura dúctil. A amostra à temperatura ambiente apresenta também delaminações, assim como nas fractografias do ensaio de tração. A Figura 20 apresenta as fractografias para os corpos de prova ensaiados a  $300^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$  e apresentam, também, microcavidades, caracterizando mecanismo de fratura completamente dúctil.

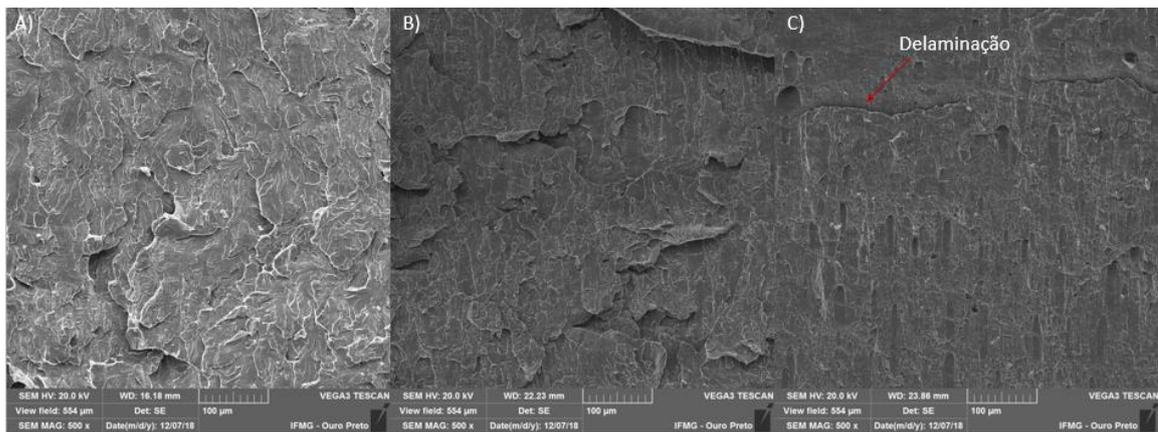


Figura 19 - Fractografias da superfície de fratura após ensaio de impacto. 500x. (a)  $-80^{\circ}\text{C}$ , (b)  $-50^{\circ}\text{C}$ , (c) temperatura ambiente.

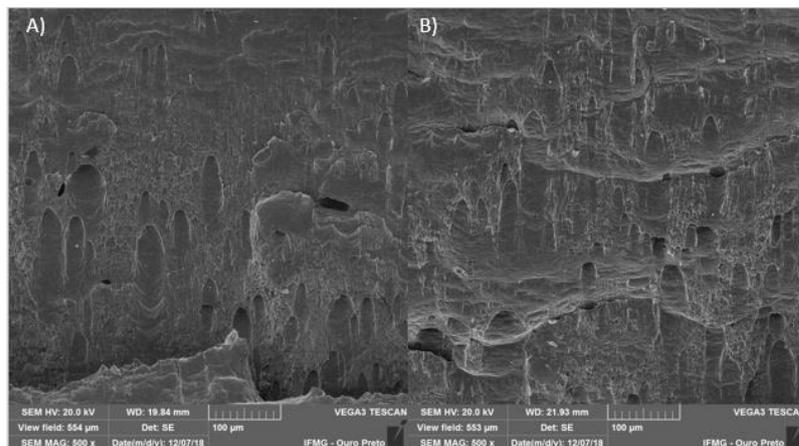


Figura 20 - Fractografias da superfície de fratura após ensaio de impacto. 500x. (a)  $300^{\circ}\text{C}$ , (b)  $600^{\circ}\text{C}$ .

## 4 CONCLUSÕES

- O aço inoxidável 410D, quando ensaiado em temperatura ambiente, apresentou valores de limite de escoamento e resistência superiores aos valores especificados.
- O aço inoxidável ferrítico 410D teve uma redução considerável de seus Limites de Escoamento e de Resistência, quando solicitado no ensaio de tração, em temperaturas superiores à ambiente, especialmente na temperatura de 600°C.
- O aço inoxidável 410D apresentou o fenômeno de envelhecimento dinâmico quando submetido à tração em temperatura de 300°C, com redução significativa do seu alongamento total.
- Nos ensaios de tração, o aço em estudo apresentou, para as três temperaturas ensaiadas, mecanismo de fratura dúctil, por meio de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades.
- Ao se comparar o comportamento mecânico do aço 410D em tração a quente com o do aço patinável USI-SAC-350, possível concorrente em diversas aplicações, submetido às mesmas condições de ensaio, foi possível observar o melhor desempenho do aço 410D.
- O aço em estudo, quando submetido ao ensaio de impacto a 600°C, apresenta o fenômeno de fragilização azul, gerando diminuição da tenacidade ao impacto do material nessa temperatura.
- O aço inoxidável 410D apresenta temperatura de transição dúctil-frágil entre -65°C e 0°C, desempenho semelhante a um aço patinável. Nas temperaturas abaixo de -50°C, apresenta mecanismo de fratura totalmente frágil, caracterizado por planos de clivagem. Para temperaturas de ensaio acima de 0°C, o aço em estudo apresenta mecanismos de fratura completamente dúctil, comprovado pela presença de dimples.

## 5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos complementares sugeridos:

1. Comportamento do aço inoxidável ferrítico 410D em tração a frio (temperaturas abaixo de zero graus celcius).
2. Processar previamente o aço inoxidável ferrítico de forma a se obter uma estrutura bifásica (ferrita e austenita) e, com essa constituição microestrutural, caracterizar o comportamento mecânico a quente submetendo a ensaios de tração a quente e de impacto Charpy.
3. Processar previamente o aço inoxidável ferrítico de forma a se obter uma estrutura completamente martensítica e, com essa constituição microestrutural, e caracterizar o comportamento mecânico a quente submetendo a ensaios de tração a quente e de impacto Charpy.

## **6 AGRADecIMENTOS**

Aos laboratórios de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) e de Ensaio Mecânico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) – UFOP.

À Aperam South America, pelo material doado e pela parceria com o LTM.

Ao Professor Doutor Geraldo Lúcio de Faria, pela orientação, oportunidade e confiança.

Ao Professor Doutor Rhelmam R. Urzedo Queiroz, pela disponibilidade e pelo constante apoio durante todo o projeto.

Aos técnicos Graciliano Francisco e Paulo Sérgio por toda disposição e apoio.

À UFOP e ao DEMET

À Eng. Amanda Aparecida Arruda, pela disponibilidade e apoio.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APERAM. 410D para taliscas de esteiras transportadoras. Biblioteca técnica. Fichas Técnicas. Disponível em: <http://brasil.aperam.com/produtos/forcainox/biblioteca-tecnica/>  
Acesso em: 01 de junho de 2019.

ARRUDA, A.F.A.; CARVALHO, A.C.; MOREIRA, P.S.; QUEIROZ, R.R.U; FARIA G.L. Características da camada de óxidos formada no aço inoxidável 410D após tratamentos isotérmicos em atmosfera oxidante. In: 73º Congresso Anual ABM. São Paulo - SP, 2018.

ASTM E8M Standard test methods for tension tensing of metallic materials. Dezembro, 2011.

ASTM E23. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conchohocken. 2007.

BAIRD, J.D., JAMIESON, A. Creep Strength of Some Synthesized Iron Allys Containin Manganese, Molybdeum and Chromium. In: Journal of The Iron and Steel Institute, 210. p. 847 – 856. 1972.

CARVALHO, A.C., FARIA G.L., MOREIRA, P.S. 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. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 78 ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, 18.; São Paulo, 2018.

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.

DIETER, G.E. Metalurgia mecânica. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1994.

FARIA, R.A., GODEFROID, L.B., REMY, L., Efeito dos elementos Ti e Nb no comportamento em fadiga dos aços inoxidáveis ferríticos utilizados no sistema de exaustão de veículos automotores. Tese de Doutorado, REDEMAT. Ouro Preto, 2006.

FARIA, G. L.; GODEFROID, L. B.; FARIA, G. A.; CUNHA, E. C. Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular em Aços Inoxidáveis Aplicados em Chapas Expandidas. 22o CBECIMAT. 2016.

FUJITA, N.; KIKUCHI, M.; OHMURA, K. Expressions for solubility products of  $Fe_3Nb_3C$  carbide and  $Fe_2Nb$  Laves phase in niobium alloyed ferritic stainless steels. ISJ International, v.43, n.12, p.1999-2006, 2003.

GARCIA, A.; Spim, A.J.; Santos, A.C. Ensaios dos Materiais. 1ªEd. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

HIBINO, A.H. Estudo da Tenacidade da Zona Termicamente Afetada dos Aços Inoxidáveis Ferríticos UNS S40910 e UNS S41003. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Minas Gerais. 2011.

KUMAR, M.V., BALASUNRAMANIAN, V., RAO, A.G. Hot tensile properties and strain hardening behaviour of super 304HCu stainless steel. In: Journal of Materials Research and Technology, ABM, 2017.

QUEIROZ, R.R.U. Envelhecimento Dinâmico em Aço Dual Phase Classe de 600Mpa de Limite de Resistência. 119f. Tese de doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 2013.

RIBEIRO, M. R. Influência da Temperatura de Trabalho na Estrutura e no Comportamento Mecânico do Aço Patinável USISAC 350. Monografia de Graduação em Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. Minas Gerais. 2013.

SCHIMITT, J.H., CHASSAGNE, F., MITHIEUX, J.D. Some recent trends in niobium ferritic stainless steels. In: Recent advances of niobium containing materials in Europe. P.134-148, 2005.

SENER, B., YURCI, M.E. Comparison of Quase-Static Constitutive Equations and Modeling of Flow Curves for Austenitic 304 and Ferritic 430 Stainless Steels. Special Issue of 6th Internation Congress e Exhibition. Turquia. 2017

SERNA, C. A. Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S43000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensitização. Tese de Doutorado. USP. 2006.

SILVA, E. S. Efeito do tratamento térmico de solubilização sobre o crescimento de grão e o grau de sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 321 e AISI 347. Dissertação de Mestrado. UFMA. 2007.

SOARES, H. G.; FARIA, G. L. Caracterização Estrutural e Mecânica de Chapas Expandidas Confeccionadas a Partir de Aços Ferríticos. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 69.; ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, 14.; São Paulo, 2014.

VILELA, L.B.M. Efeito da Deformação a Frio e da Temperatura de Recozimento Final Sobre a Evolução Estrutural de um de um Aço Inoxidável Ferrítico ASTM 410. Dissertação de Mestrado. REDEMAT-UFOP. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – Minas Gerais. 2017.