

Efeito do grau de deformação na formação de martensita induzida por deformação em uma liga de aço inox dúplex UNS S32205

Ewerton Rodrigues Silveira¹
Eduardo da Rosa Vieira²
Jorge Luis Braz Medeiros³
Felipe Sette Grohs⁴
Luciano Volcanoglo Biehl⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a formação de martensita induzida por deformação (MID), para diferentes graus de deformação em uma liga de aço inoxidável dúplex UNS S32205. Para a realização deste estudo, foram aplicados cinco (5) níveis de deformações, variando-se de cinco (5) a trinta por cento (30%). Posteriormente, as microdurezas e microestruturas foram analisadas, através de microdurômetro, microscópio óptico e eletrônico de varredura, respectivamente. Por análise metalográfica, foi possível identificar a presença de MID em todos os graus de deformação. Um aumento significativo de microdureza ficou evidente nas fases MID, quando comparados com a condição preliminar às deformações.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis dúplex. MID. Deformação.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the formation of the strain-induced martensite (SIM) for different degrees of deformation in a duplex stainless-steel alloy UNS S32205. In order to perform this research, five (5) levels of deformation were performed, from five (5) to thirty per cent (30%). Later, the microhardness and microstructure samples were analyzed by microhardness tester, optical microscopy and scanning electron microscopy. Through metallography analysis, was possible to identify the presence of SIM in all degrees of deformation. A significant increase of microhardness was evidenced in the SIM phases, when compared with the condition before the deformations.

Keywords: Duplex stainless steel. Strain-induced martensite. Strain hardening.

1 Bacharel em Engenharia Mecânica e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da FURG. E-mail: ewertonsilveira79@gmail.com.

2 Bacharel em Engenharia Mecânica e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela FURG. E-mail: vieira.r.eduardo@hotmail.com.

3 Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil. Professor da Escola de Engenharia na FURG. E-mail: jorge.braz@furg.br.

4 Bacharel em Engenharia Mecânica e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela FURG. E-mail: felipesette7@gmail.com.

5 Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Professor da Escola de Engenharia e coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela FURG. E-mail: lucianobiehl@furg.br.

1 Introdução

A indústria metal-mecânica vem utilizando, cada vez mais, os aços inoxidáveis em virtude de suas excelentes características de: resistência à corrosão, resistência mecânica, capacidade de conformação mecânica entre outras. Em razão disso, os aços inoxidáveis são utilizados como produtos em diversas áreas, desde fachadas, condições criogênicas, eletrodomésticos, indústria automotiva e área médica. Por sua vez, os aços inoxidáveis dúplex vêm ganhando força no mercado, devido a suas excelentes propriedades mecânicas aliadas à ótima resistência à corrosão.

Os aços inoxidáveis austeníticos não são endurecidos por tratamento térmico, porém podem aumentar sua resistência mecânica, quando deformados, surgindo uma estrutura conhecida por martensita induzida por deformação (MID). Esse mecanismo pode ser aplicável também aos aços inoxidáveis dúplex para aumento da resistência mecânica. Existem alguns trabalhos que focam a formação de martensita induzida por deformação em aços inoxidáveis austenítico, mas pouco estudado nos aços inoxidáveis dúplex. Estudos aplicados à formação de martensita induzida por deformação demonstram um aumento de resistência mecânica, sem a perda efetiva da ductilidade. As duas fases presentes nos aços inoxidáveis dúplex, ferrita e austenita apresentam comportamentos completamente diferentes, quanto a deformação plástica. A ferrita, devido à grande quantidade de sistemas de deslizamento e a maior energia de falha de empilhamento sofre menor encruamento. Já a austenita, por possuir um número menor de sistemas de deslizamento e menor energia de falha de empilhamento, podendo se transformar em martensita, quando deformada (AGUIAR, 2012).

Este trabalho teve por objetivo analisar o efeito do grau de deformação de um aço inoxidável dúplex UNS S32205, com níveis de cinco (5%) até trinta por cento (30%) de deformação na formação da martensita induzida por deformação.

2 Revisão da literatura

Os aços inoxidáveis dúplex são assim chamados porque possuem uma microestrutura constituída de duas fases principais, ferrita e austenita. Quando o aço inoxidável dúplex é obtido na aciaria, a sua solidificação, a partir da fase líquida, gera uma microestrutura completamente ferrítica. À medida que o material resfria até a temperatura ambiente, cerca de metade dos grãos ferríticos se transformam em grãos austeníticos (“ilhas”). O resultado é uma microestrutura com aproximadamente cerca de cinquenta por cento (50%) de austenita e cinquenta por cento (50%) de ferrita.

Existe uma relação direta entre a microestrutura dos metais, seus mecanismos de deformação e também na formação da textura dos mesmos. No que tange à energia envolvida na deformação, noventa e nove por cento (99%) é dissipado na forma de calor e apenas um por cento (1%) fica armazenado no material deformado. Tal energia fica localizada nos defeitos pontuais e também nas discordâncias que são criadas durante a deformação (GAUSS, 2015). A deformação plástica é um processo de criação de defeitos cristalinos, tais como a criação de discordâncias e maclas. Esse fenômeno ocorre pelo deslizamento de planos preferenciais, durante a aplicação das forças que deformam o material plasticamente. Esses defeitos podem aumentar da casa de 10^3 para 10^9 , logo após a ocorrência da deformação plástica.

Entretanto, a forma da distribuição dos defeitos gerados pela deformação plástica está relacionada intrinsecamente à estrutura cristalina do material. Por exemplo, os materiais com estrutura austenítica (CFC) têm uma distribuição homogênea das discordâncias, enquanto os materiais cúbicos do corpo centrado (CCC) possuem uma distribuição mais heterogênea. Essas diferenças estão ligadas à energia de defeito de empilhamento do material, sendo alta para a ferrita e baixa para a austenita. A figura 1 apresenta um esquema da distribuição das discordâncias de um grão austenítico e de um grão ferrítico (AGUIAR, 2012).

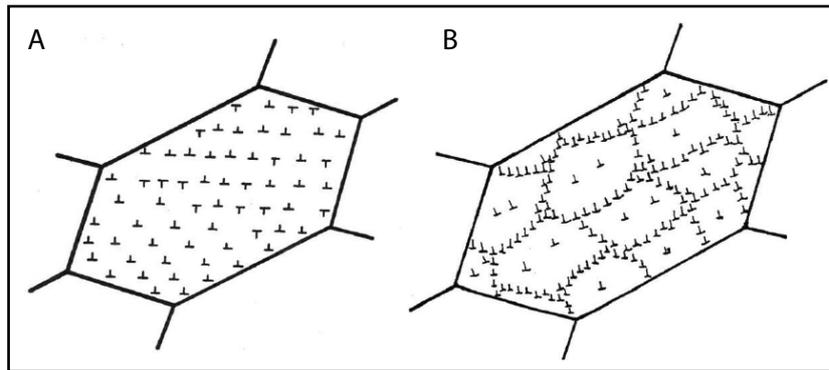


Figura 1 - Esquema da distribuição de discordâncias de grãos encruados: A- Grão austenítico; B- Grão ferrítico
Fonte: Padilha, Aguiar e Plaut (2012).

A martensita pode ser obtida de duas maneiras, sendo, a primeira, através do resfriamento rápido, desde que não haja estabilizadores da austenita na composição química e, a segunda, induzida por deformação. Nos dois casos, ocorre um aumento da resistência mecânica do material, quando comparado com seu estado inicial, sem a presença da microestrutura martensítica. Em cada caso, o processo fenomenológico é completamente diferente, apesar de, no final, ambos causarem um aumento de resistência nos materiais.

O caso mais conhecido é de formação da martensita por distorção do reticulado no resfriamento rápido. Nesse tipo de transformação, existe a promoção de uma elevada taxa de cisalhamento na rede cristalina. Essa transformação ocorre, devido ao aprisionamento do carbono dentro da estrutura cúbica de corpo centrado, que acaba deformando a estrutura cristalina, transformando-a em tetragonal de corpo centrado.

Devido a essa mudança repentina, o volume do material aumenta na faixa de quatro por cento (4%). A presença da alta energia acumulada, faz com que seja necessário um tratamento térmico de alívio dessas tensões, chamado revenimento, que, na prática, deve ser realizado até uma (1) hora, após o resfriamento brusco. Caso não seja realizado, o dano do material pode ser permanente. Nota-se que essa transformação é adifusional e instantânea. A martensita primária, agora formada, é uma fase metaestável, de alta resistência mecânica.

Na prática, observa-se que a faixa de carbono, em que as taxas de transformação são mais efetivas, está entre três décimos por cento (0,3%) e oito décimos por cento (0,8%). Abaixo desse valor, o carbono não consegue ficar aprisionado dentro da estrutura cúbica de corpo centrado. Para valores mais altos do que oito décimos por cento (0,8%), a energia é tão grande que alguns grãos não apresentam força para se transformar da fase austenítica para a fase ferrítica, como consequência, temos a reação incompleta, surgindo então a austenita retida, juntamente com a martensita (MARESCA; CURTIN, 2017).

A outra maneira de obter a martensita é através do processo de deformação. Como já discutido anteriormente, isso ocorre, quando temos uma estrutura austenítica e essa é deformada, determinando a formação da microestrutura definida como MID. Isso está associado à menor energia de defeito de empilhamento que os aços austeníticos possuem.

Comumente, a martensita induzida por deformação é usada em aços com alto teor de manganês, conhecido como aços Hadfield. Esses são aços com carbono entre um (1) e um e quatro décimos por cento (1,4%) e manganês entre doze (12) e quatorze por cento (14%). O manganês facilita a estabilidade da austenita até a temperatura ambiente, onde ela pode ser transformada em martensita por deformação plástica. São utilizados em ferramentas pneumáticas, dentes de escavadeira, mandíbulas de máquinas de britar, agulhas de ferrovias (SILVA, 2006).

Para a obtenção de martensita induzida por deformação nos aços inoxidáveis, necessita-se ter inicialmente a presença da fase austenítica na microestrutura, pois será ela que irá se transformar em martensita. Nesse caso, os aços que têm tais características são os pertencentes às classes dos austeníticos e dúplex.

No caso dos aços inoxidáveis austenítico, devido a sua grande aplicabilidade na indústria da estampagem, uma deformação mais profunda poderá gerar a martensita induzida por deformação e, nesses casos, a mesma pode ser deletéria, pois teremos regiões com alta resistência mecânica que poderão nuclear trincas. Echeverri (2017) e Dreher (2016) estudaram esse fenômeno na estampagem a frio de cubas e uma alternativa é a realização dessas deformações em temperaturas mais altas. No que tange a questão da formação da martensita, envolvendo processos sem a presença da temperatura, é interessante notar a diferença entre martensita induzida por tensão e martensita induzida por deformação, conforme a figura 2.

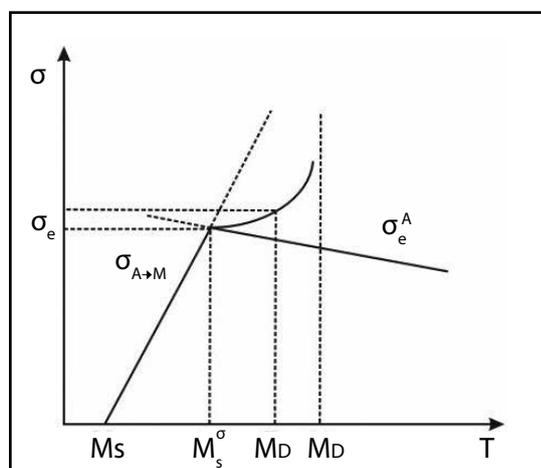


Figura 2 - Relação entre martensita induzida por tensão e martensita induzida por deformação
Fonte: Castro (2003).

Na temperatura M_s , a força motriz é suficiente para nuclear a martensita sem aplicação de tensão. Em temperaturas entre M_s e M_s^σ , ocorre nucleação de martensita, mas apenas com a aplicação de tensão. Nesse caso, tem-se a transformação induzida por tensão, na qual a

tensão requerida para iniciar a transformação martensítica está na região elástica (abaixo de σ_e), mas aumenta com o aumento da temperatura, devido à diminuição da força motriz. Em M_s^σ , a tensão crítica para formar martensita é igual ao limite de escoamento da austenita. Assim, a tensão, na qual a transformação é iniciada, tende a seguir σ_e^A , logo acima de M_s^σ . Entretanto, em temperaturas mais altas, por exemplo, T_D (uma deformação plástica adicional) faz com que a tensão para deformar plasticamente a austenita aumente, devido ao encruamento e se torne igual à σ_{A+M} , é necessária para compensar a redução na força motriz, fazendo com que a tensão, para que ocorra a transformação aumente em relação ao limite de escoamento. Para temperaturas superiores a M_D , o aumento da tensão para deformar plasticamente a austenita não é suficiente, para que a tensão atinja o valor de σ_{A+M} e torna-se impossível formar martensita induzida por deformação plástica. Assim, no intervalo de temperaturas entre M_s e M_s^σ , tem-se a martensita induzida por tensão, enquanto que, entre M_s^σ e M_D , tem-se a transformação induzida por deformação (SALES, 2006).

A utilização dos aços inoxidáveis dúplex é diferente, quando comparada à dos aços inoxidáveis austeníticos. A mistura de ferrita e austenita fornece uma característica de elevada resistência mecânica, não perdendo a ductilidade. Nesse caso, tentar transformar a austenita do dúplex em martensita induzida por deformação pode ser uma boa alternativa para aumentar ainda mais a resistência mecânica desses aços.

Quando se compara a possibilidade de transformar austenita em martensita induzida por deformação, os aços inoxidáveis austenítico levam vantagem, pois os mesmos apresentam uma microestrutura cem por cento (100%) austenítica. Gauss (2015), em 2005, estudou esse fenômeno e avaliou a fração de austenita transformada de um aço inoxidáveis austenítico AISI 304 L, com composições nominais de dezoito por cento (18%) de cromo, oito por cento (8%) de níquel e carbono na

casa de três centésimos por cento (0,03%), por ser a versão L. Já o aço inoxidável dúplex utilizado foi o UNS S31803, também conhecido como UNS S32205, ou simplesmente o AISI 2205, que possui a composição nominal de vinte e cinco por cento (25%) de cromo, cinco por cento (5%) de níquel, três por cento (3%) de molibdênio e baixo carbono, na ordem de três centésimos por cento (0,03%). Nessas situações, devido ao dúplex possuir cinquenta por cento (50%) de austenita, a quantidade de martensita induzida por deformação transformada será menor, quando comparado ao aço inoxidável austenítico. A figura 3 apresenta tal evidência.

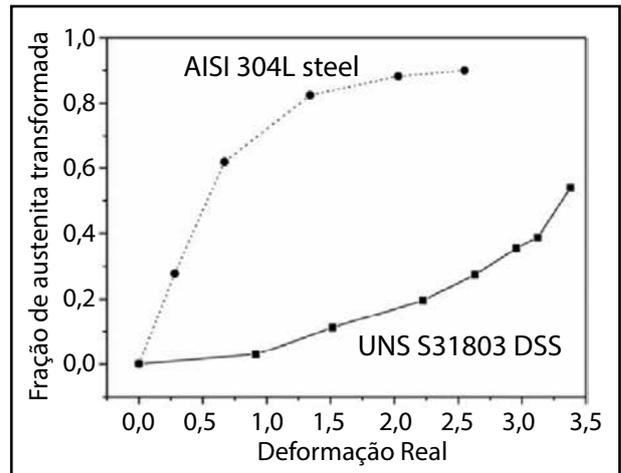


Figura 3 - Comparação da fração de martensita induzida por deformação de um aço inoxidável austenítico e dúplex
Fonte: Gauss (2015).

A martensita induzida por deformação apresenta características bem definidas. Dependendo

do grau de deformação, ela apresenta morfologias diferentes, conforme a figura 4.

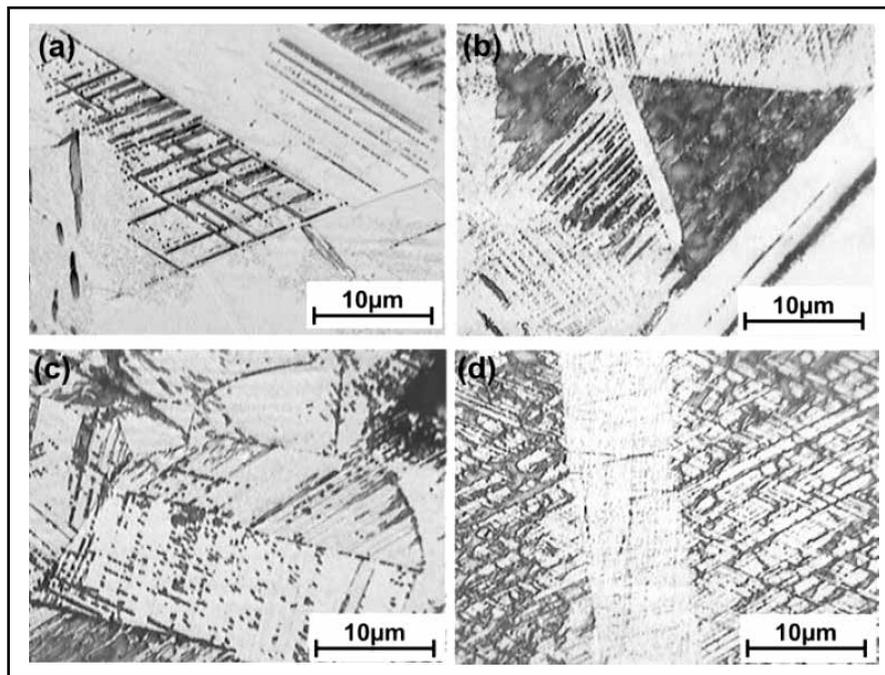


Figura 4 - Micrografias ópticas das amostras deformadas: (a) três por cento (3%), (b) seis por cento (6%), (c) nove por cento (9%) e (d) doze por cento (12%) de um aço inoxidável AISI 304
Fonte: Santos, Andrade e Castro (2009).

Podemos notar que as regiões escuras correspondem à martensita α' e as regiões claras correspondem à matriz austenítica. A martensita α' , que se apresenta na forma de placas paralelas, interceptando a superfície da amostra, aumenta com a deformação. Quando essas placas atingem

densidades maiores, elas se juntam e formam um efeito contínuo, como se fossem pacotes de martensita. Essas placas são, na verdade, ripas de martensita α' que cruzam a superfície da amostra como pequenos pontos. A maioria dessas ripas se forma nas intersecções das placas de

martensita e de diferentes orientações cristalográficas (SANTOS; ANDRADE; CASTRO, 2009).

Estudos realizados por Moallemi, Zarei-Hanzaki e Baghbadorani (2017), demonstram o surgimento de martensita induzida por deformação em um aço inoxidável dúplex. Na

figura abaixo, é possível observar que entre as ilhas de ferrita e austenita o dúplex apresentou a martensita induzida por deformação. Nessa situação, ocorreu a transformação parcial da austenita em MID, pois o processo realizado foi de conformação a quente.

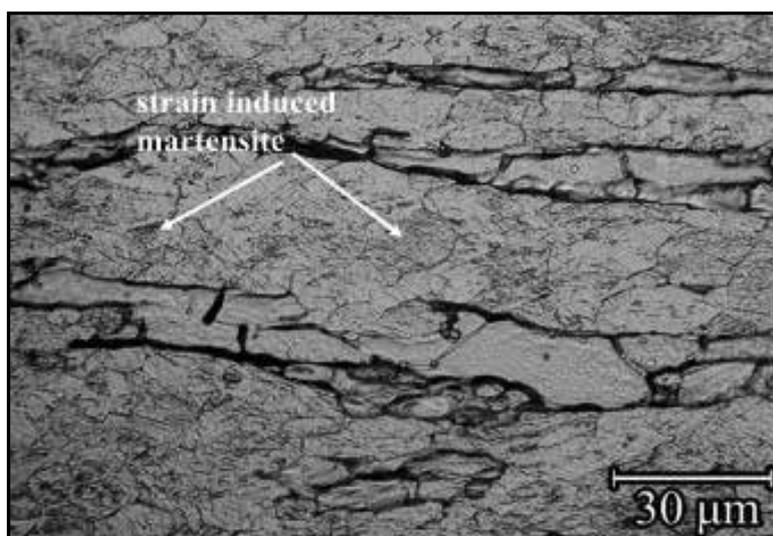


Figura 5 - Aço Inoxidável dúplex deformado, apresentando martensita induzida por deformação
Fonte: Moallemi, Zarei-Hanzaki e Baghbadorani (2017).

Os aços inoxidáveis dúplex são relativamente novos e suas aplicações ainda estão sendo estudadas. Faz-se necessário compreender melhor suas características, bem como, relacionar os níveis de deformação a frio e a possibilidade de formação de martensita induzida por deformação.

3 Materiais e métodos

Para a realização deste trabalho, foi utilizado um aço inoxidável dúplex do tipo UNS S32205, cuja composição química é mostrada na tabela 1. O aço de fabricação foi fornecido pela Companhia ArcelorMittal Inox Brasil na forma de barras.

Tabela 1 - Composição química do aço UNS S32205

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	N
0,025	1,5	1	22	5	0,02	0,01	3	0,15

Fonte: Os autores (2017).

A composição do aço inoxidável dúplex se encontra dentro dos valores especificados da norma UNS S 32205. A figura 6 apresenta o organograma metodológico seguido na pesquisa.

As amostras de aço inoxidável dúplex foram recebidas na forma de barras de 10mm

de diâmetro. Após foram cortadas e identificadas em 7 amostras, conforme a figura 7.

Realizou-se análise química por emissão óptica para determinação da composição química do aço inoxidável dúplex, sendo utilizado o espectrômetro de emissão óptica modelo Fondry-Master Pro, marca Oxford Instruments.

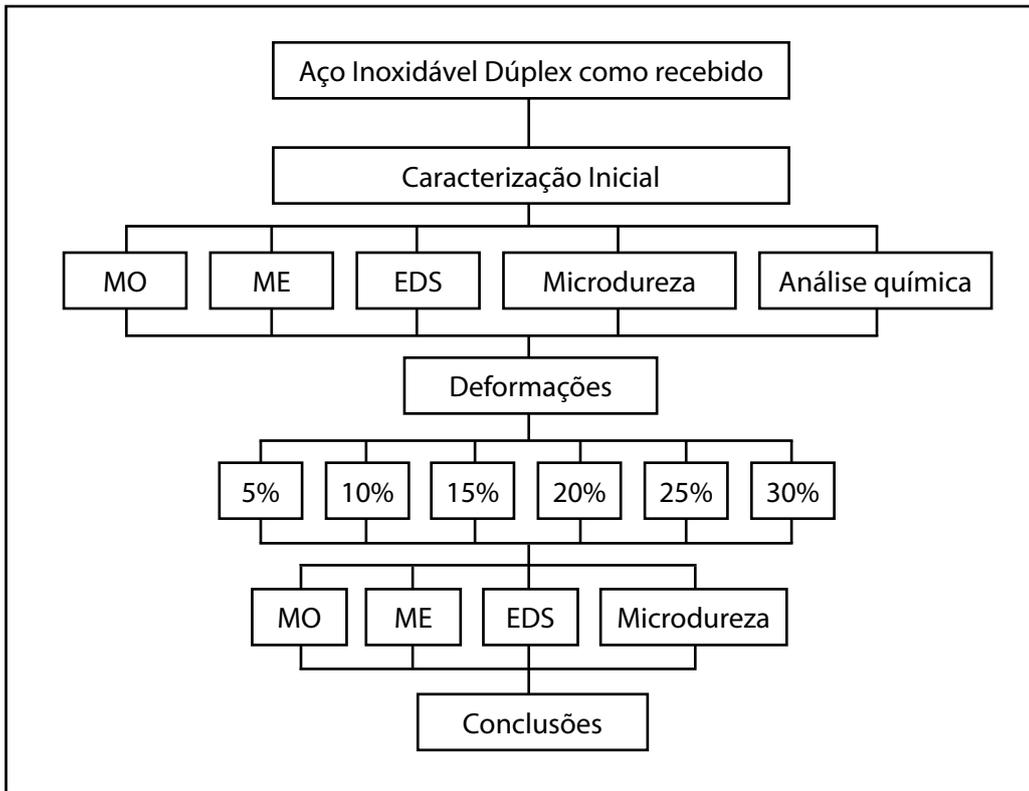


Figura 6 - Organograma metodológico da pesquisa
Fonte: Os autores (2017).

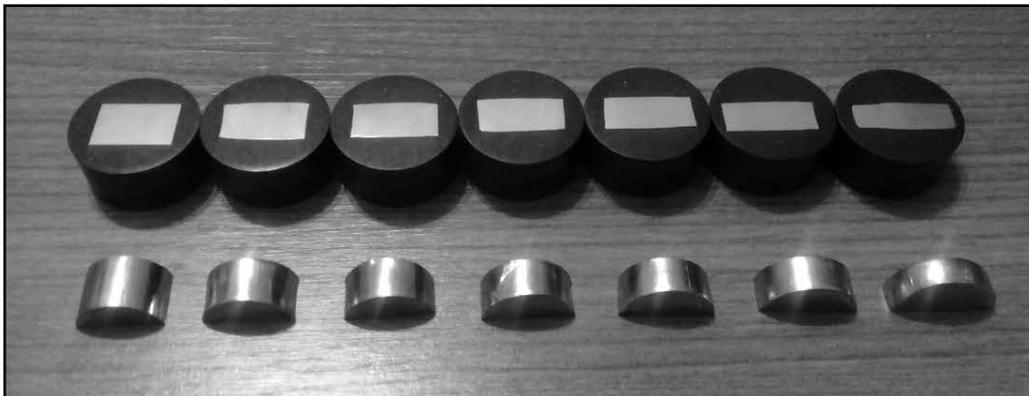


Figura 7 - Amostras cortadas e identificadas
Fonte: Os autores (2017).

Para a observação das amostras no microscópio, utilizou-se os procedimentos comuns de metalografia, consistindo em lixamento, polimento e ataque químico com o reativo de Vilela. As análises metalográficas ocorreram em um microscópio óptico de luz refletida, Olympus GX 51S, com sistema de aquisição de imagens digitais.

Com o objetivo de analisar com maior precisão as microestruturas do aço inoxidável dúplex, as amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura, sendo o equipamento utilizado marca JEOL modelo JSM-6610LV do CEME-SUL da FURG.

A técnica de microsonda EDS acoplada ao MEV contribuiu para a identificação das fases

presentes. O balanço químico do aço inoxidável duplex estudado apresenta pequena quantidade de carbono, sendo o mesmo dissolvido, em sua totalidade, na austenita, por a mesma apresentar maior limite de solubilidade do carbono, quando comparado a ferrita.

Posteriormente, as amostras foram deformadas a frio com o objetivo de se obter deformação mecânica. Existem vários tipos de possibilidades de realizar a redução de espessura. Neste trabalho, utilizou-se o método de deformação por pressão, através de uma prensa pneumática de carga máxima 45 ton. Foram separadas 6 amostras de 16 mm de diâmetro e 10 mm de altura, sendo que, na primeira delas, utilizou-se a carga máxima da prensa, obtendo assim, um grau de deformação equivalente a trinta por cento (30%). Partindo, então, da premissa de trinta por cento (30%), as outras 5 amostras foram deformadas, para que fossem obtidos os respectivos graus de deformação: vinte e cinco por cento (25%); vinte por cento (20%), quinze por cento (15%); dez por cento (10%) e cinco por cento (5%).

Para avaliar a microdureza das fases, as amostras passaram por ensaio de microdureza Vickers, com equipamento da marca Shimadzu, modelo HMV-2T. Os ensaios foram realizados

com carga de cinquenta gramas (50g) por dez segundos (10s), em amostras polidas. As indentações foram distribuídas, em dez (10) pontos diferentes, sendo as mesmas realizadas no núcleo e junto à superfície.

4 Resultados e discussões

A espectrometria por emissão ótica teve a função de analisar a composição química do material e verificar se a mesma conferia com a composição teórica fornecida pela fabricante do metal. Todos os elementos se enquadraram dentro dos limites do aço inoxidável duplex UNS S32205, apresentados na tabela 1.

Na análise microestrutural, notou-se que o material apresenta duas fases bem definidas. Essas fases são representativas da presença de ferrita e austenita, a partir de um substrato de aço inoxidável duplex. As fases escuras foram caracterizadas como austenita, conforme o International Molybdenum Association (2009). A avaliação da presença das fases ferrítica e austenítica foi realizada, através da técnica de microscopia ótica, eletrônica de varredura, EDS, DRX e ataque químico seletivo. A figura 8 apresenta a micrografia ótica da amostra de aço inoxidável duplex, sem a aplicação da deformação.

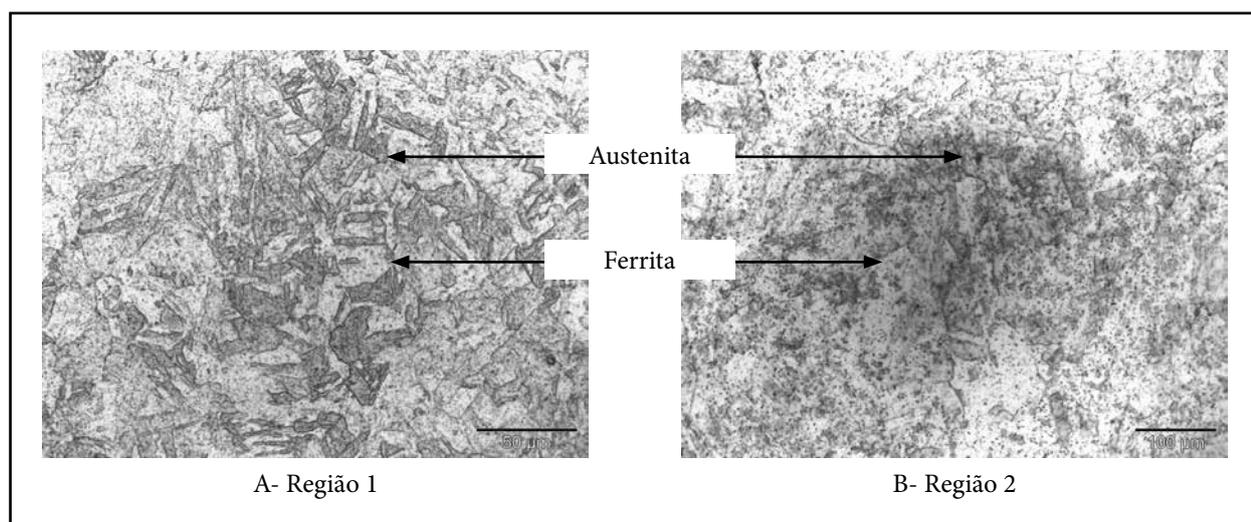
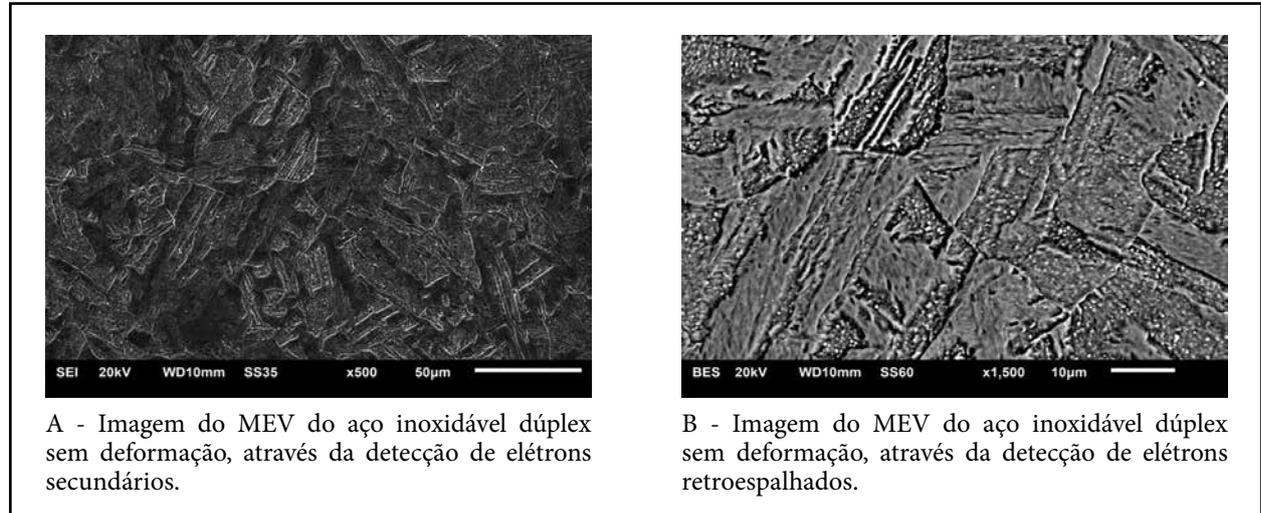


Figura 8 - Amostra de aço inoxidável duplex não deformada: A- região 1 e B: região 2
Fonte: Os autores (2017).

Ao se observar a amostra sem deformação no microscópio eletrônico de varredura, na figura 9, nota-se que tanto na detecção de elétrons

secundários, quanto através de elétrons retroespalhados, é possível observar a presença de duas fases, sendo caracterizadas como austenita e ferrita.



A - Imagem do MEV do aço inoxidável dúplex sem deformação, através da detecção de elétrons secundários.

B - Imagem do MEV do aço inoxidável dúplex sem deformação, através da detecção de elétrons retroespalhados.

Figura 9 - Imagens do MEV do aço dúplex sem deformação:
A- detecção de elétrons secundários e B- detecção, através de elétrons retroespalhados
Fonte: Os autores (2017).

Segundo Maresca e Curtin (2017), a fase em alto relevo, na figura 9, é a austenita, enquanto a fase em baixo relevo, é a ferrita. Para a confirmação experimental das fases austenita e ferrita, utilizou-se a técnica do Sistema de Energia Dispersiva (EDS), conforme a figura 10.

pontuais, como indicadas na figura 10. Em todas as regiões, analisadas por EDS, é observada a presença de elementos estabilizadores da ferrita e da austenita. As composições químicas, obtidas por EDS, são semiquantitativas e, analisando os grãos de ferrita, confirmou-se a presença menor de carbono, devido a sua baixa solubilidade.

A análise 1 considerou toda área da imagem analisada e as análises 2 e 3 foram

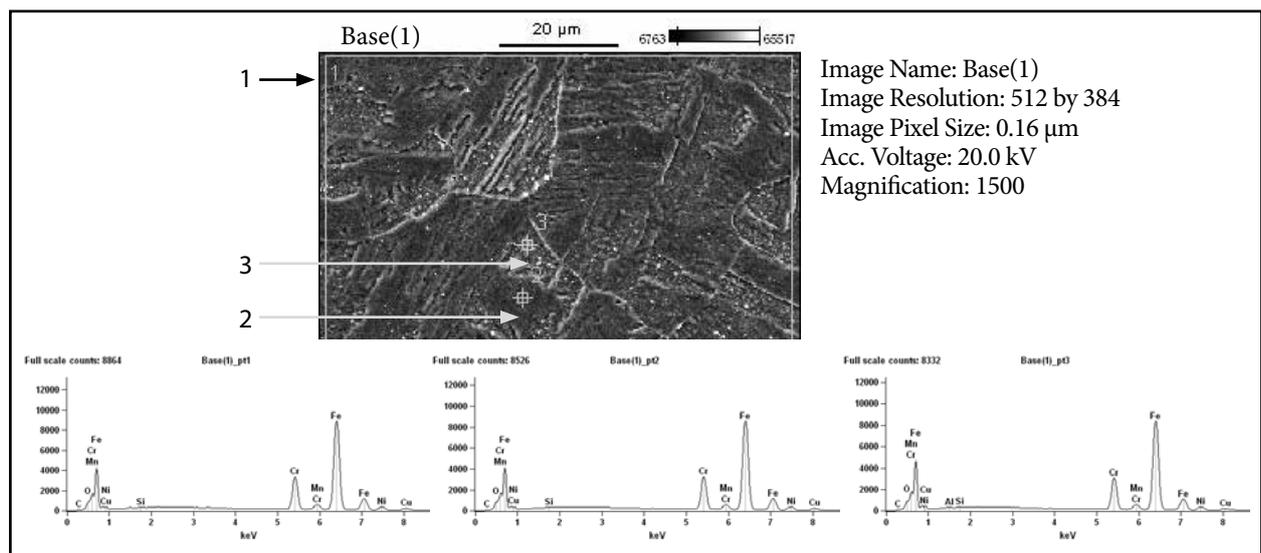


Figura 10 - Análise pontual do aço inoxidável dúplex sem deformação
Fonte: Os autores (2017).

Devido ao fato da quantidade de carbono dos aços inoxidável dúplex ser baixa, ocorrendo ainda a profundidade da detecção do EDS, avalliu-se que em alguns pontos os valores encontrados caracterizaram a interface entre as fases.

O primeiro nível de deformação escolhido foi o equivalente a cinco por cento (5%). Esse

valor foi proposto conforme Santos, Andrade e Castro (2009), que indica que valores equivalentes a esse nível, são favoráveis à formação da martensita induzida por deformação em aços inoxidáveis austeníticos. Na figura 11, observa-se a presença das fases ferrita e austenita em duas regiões, porém sem evidências de MID.

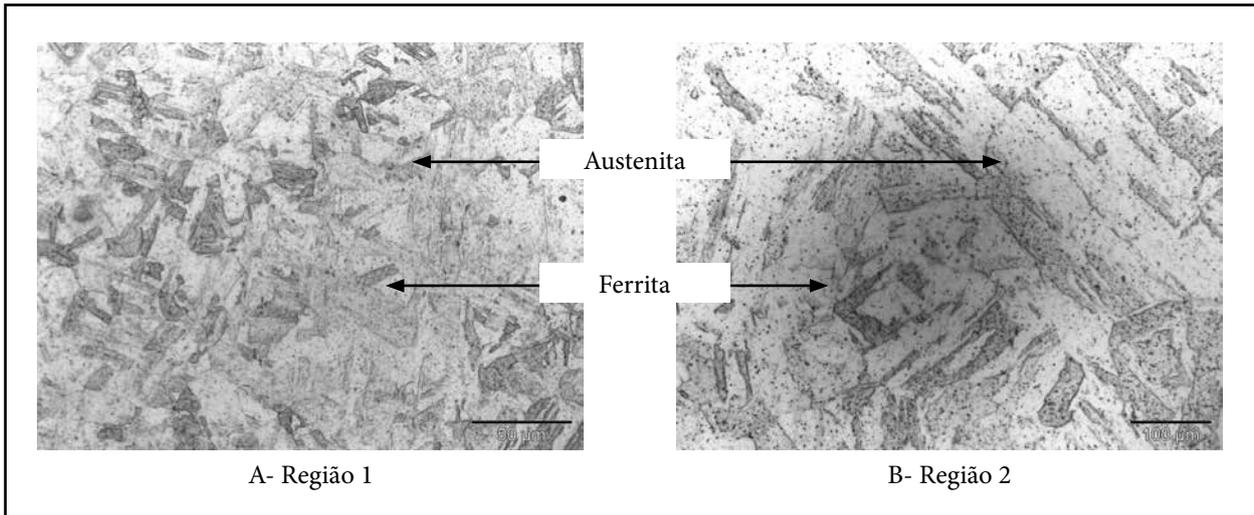


Figura 11 - Amostra de aço inoxidável dúplex deformada em cinco por cento (5%): A- região 1 e B: região 2
Fonte: Os autores (2017).

Para melhor detalhamento e análise da possível formação da martensita induzida por deformação, a figura 12 apresenta a imagem

do MEV, através de elétrons secundários e elétrons retroespalhados, sendo detectada a presença de MID.

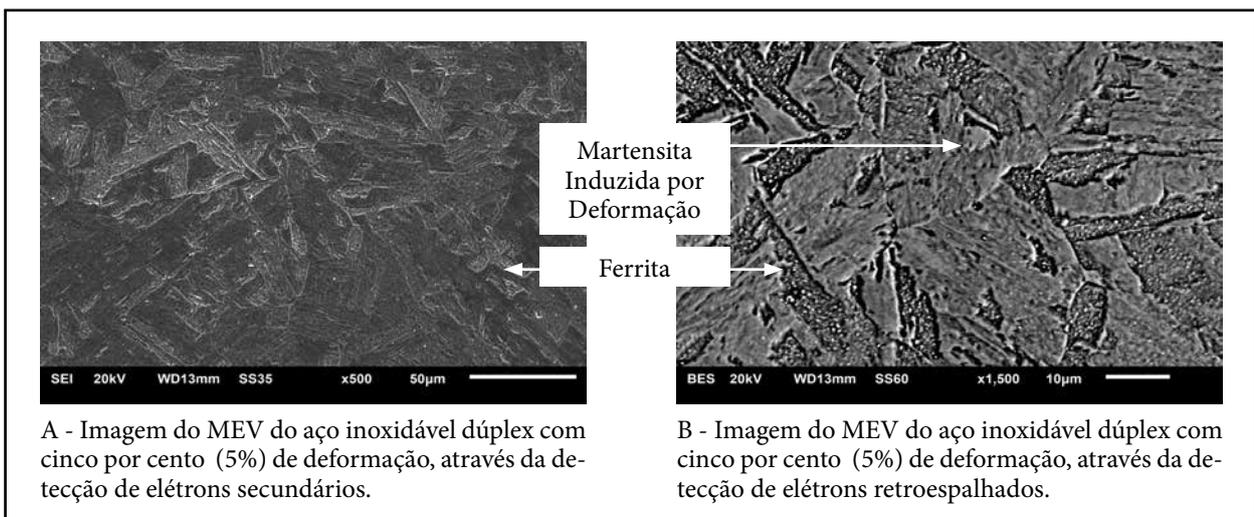


Figura 12 - Imagens do MEV do aço dúplex com deformação de cinco por cento (5%): A- detecção de elétrons secundários e B- detecção, através de elétrons retroespalhados
Fonte: Os autores (2017).

As análises, a partir desse ponto, serão pautadas apenas na austenita e não mais na ferrita, por ela ser o ponto de surgimento da martensita induzida por deformação. Na imagem B, da figura 12, formada por elétrons retroespalhados, é possível observar as primeiras placas de martensita induzida por deformação.

Ainda não é possível observar com clareza indícios de formação de martensita induzida por deformação, através da microscopia ótica, ao nível de dez por cento (10%). Porém, a presença de MID fica evidente na figura 13, com imagens do MEV, através de elétrons secundários e elétrons retroespalhados.

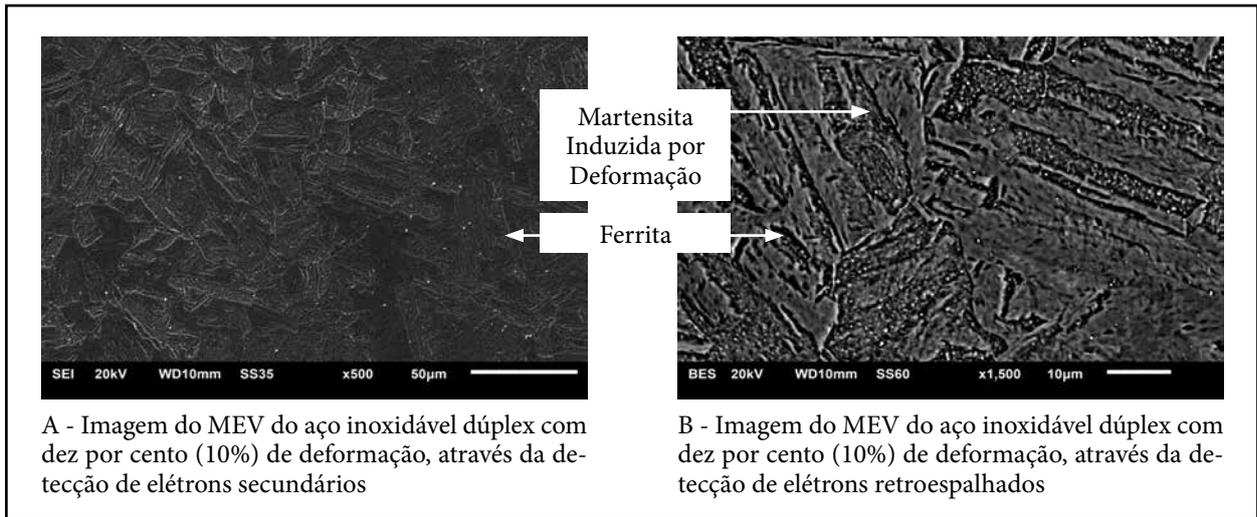


Figura 13 - Imagens do MEV do aço dúplex com dez por cento (10%) de deformação: A- detecção de elétrons secundários e B- detecção, através de elétrons retroespalhados
Fonte: Os autores (2017).

A partir de quinze por cento (15%) de deformação, detectou-se a presença de MID, já com a

utilização de microscopia óptica, conforme observado na figura 14 A-B.

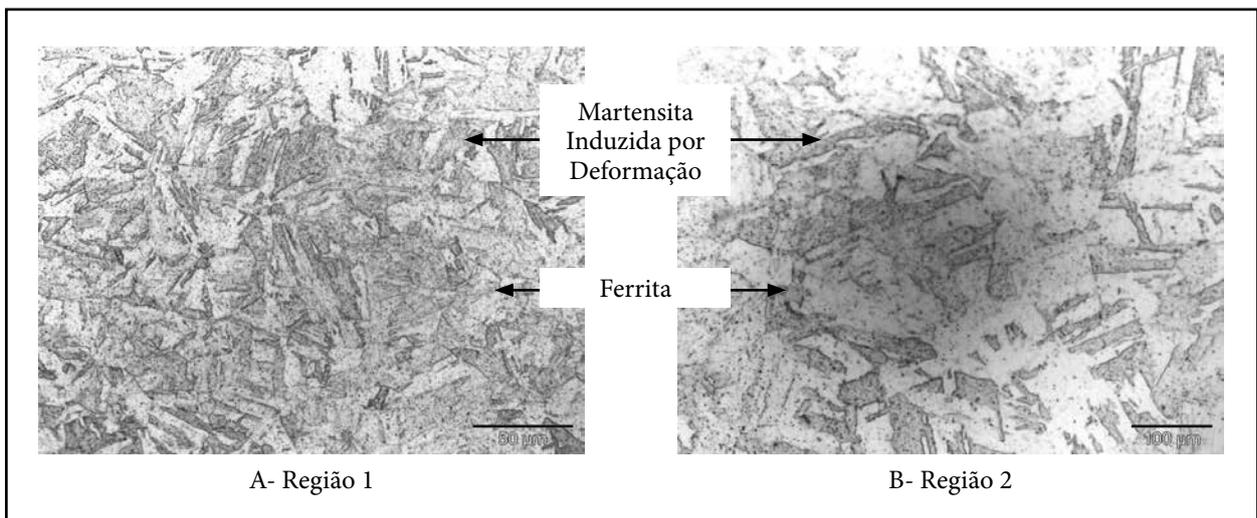


Figura 14 - Amostra de aço inoxidável dúplex deformada em quinze por cento (15%): A- região 1 e B: região 2
Fonte: Os autores (2017).

A presença de MID, a partir de quinze por cento (15%) de deformação, apresenta maior

definição também em microscopia eletrônica de varredura, como mostrado na figura 15.

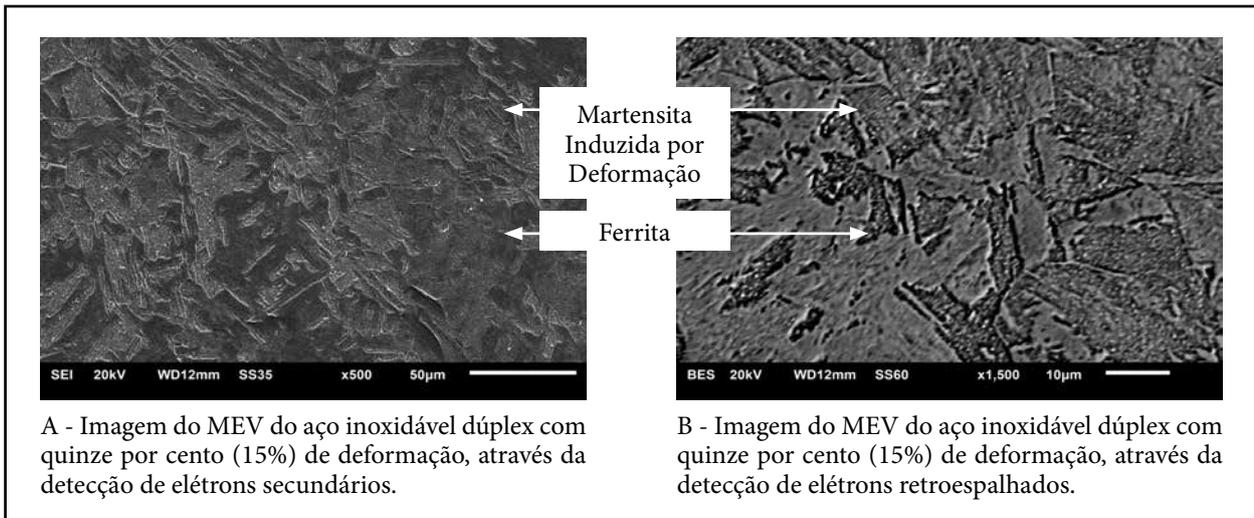


Figura 15 - Imagens do MEV do aço dúplex sem deformação: A- detecção de elétrons secundários e B- detecção, através elétrons retroespalhados.

Fonte: Os autores (2017).

As figuras 16 A-B e 17 A-B demonstram as imagens em microscopia óptica e MEV, respectivamente, do aço inoxidável

dúplex deformada, na taxa de vinte por cento (20%), com a presença bem definida de MID.

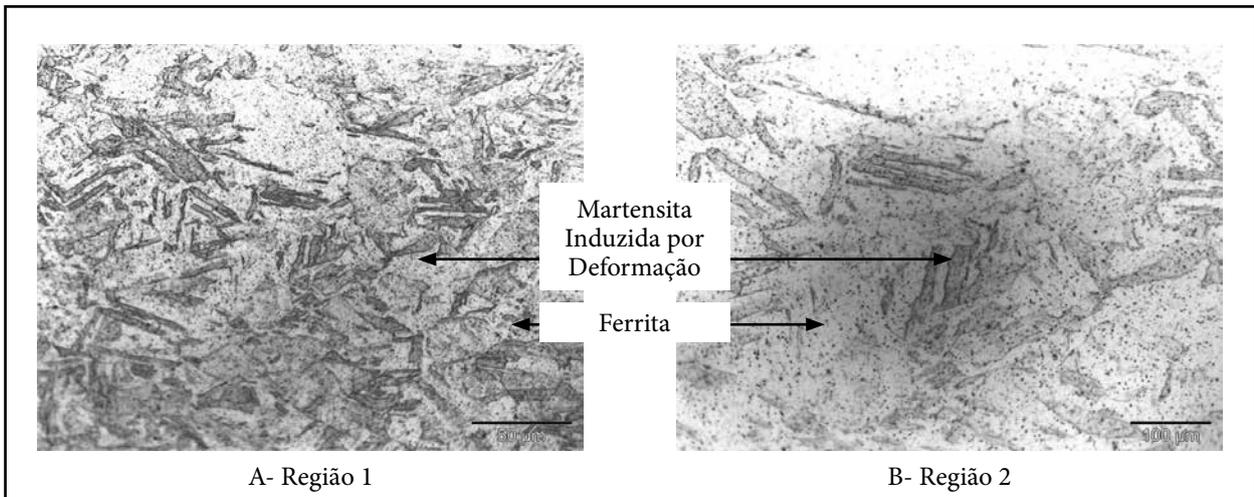


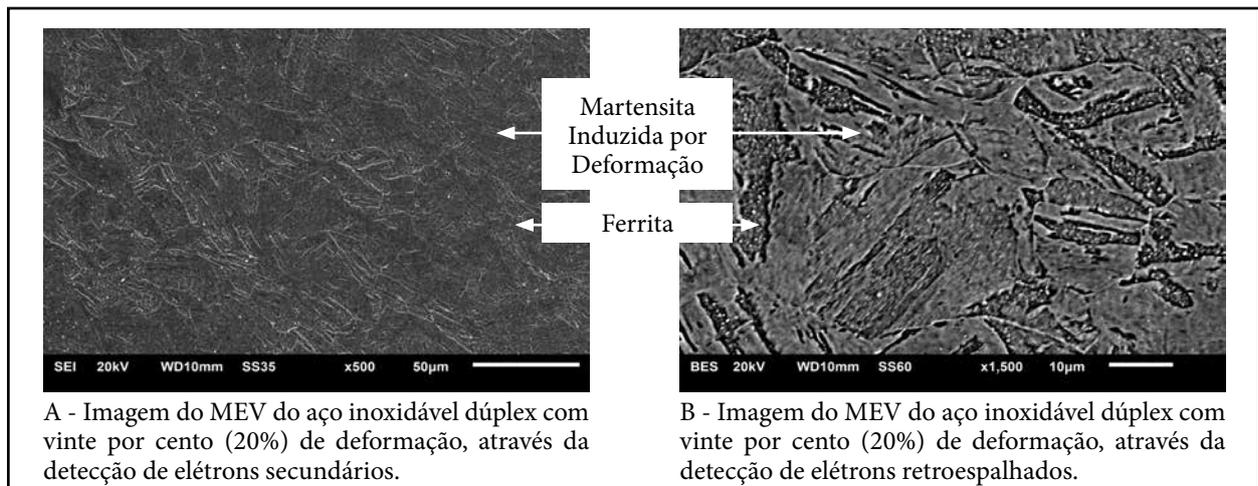
Figura 16 - Amostra de aço inoxidável dúplex deformada em vinte por cento (20%): A- região 1 e B: região 2

Fonte: Os autores (2017).

Ainda, na figura 16, observam-se pequenos indícios de martensita induzida por deformação, com muita semelhança à amostra, com deformação de quinze por cento (15%), ou seja, para os níveis de quinze por cento (15%) e vinte por cento (20%), não fica nítida diferença quantitativa na incidência de MID. O aumento de martensita induzida por

deformação pode ser mais evidenciado, nesse caso, através da imagem oriunda dos elétrons retroespalhados, conforme figura 17 (SATO; SUEYOSHI; YAMADA, 2015).

As figuras 18 e 19 apresentam as imagens de microscopia óptica e MEV, respectivamente, para um nível de deformação de vinte e cinco por cento (25%).



A - Imagem do MEV do aço inoxidável dúplex com vinte por cento (20%) de deformação, através da detecção de elétrons secundários.

B - Imagem do MEV do aço inoxidável dúplex com vinte por cento (20%) de deformação, através da detecção de elétrons retroespalhados.

Figura 17 - Imagens do MEV do aço dúplex com deformação de vinte por cento (20%): A- detecção de elétrons secundários e B- detecção, através de elétrons retroespalhados.

Fonte: Os autores (2017).

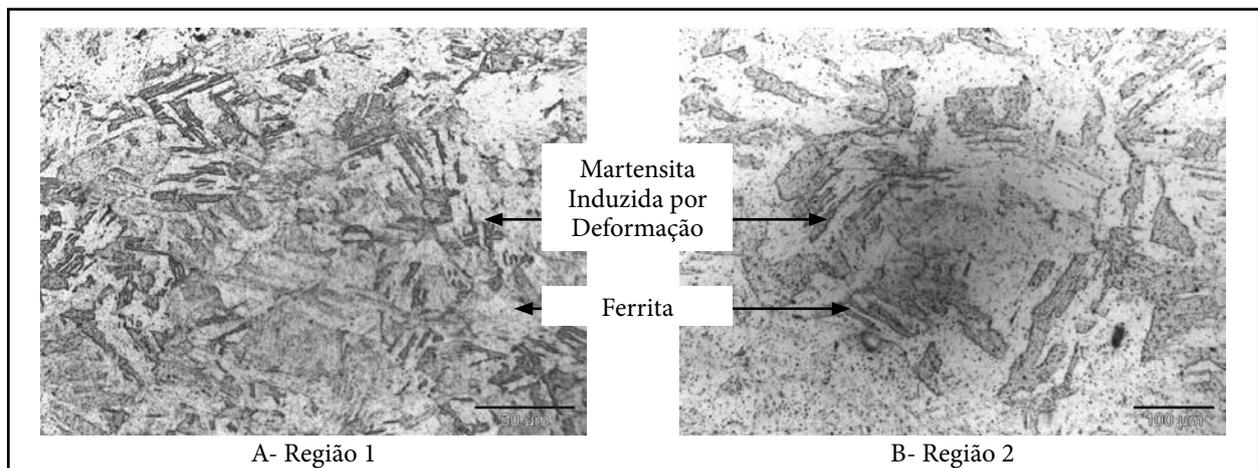
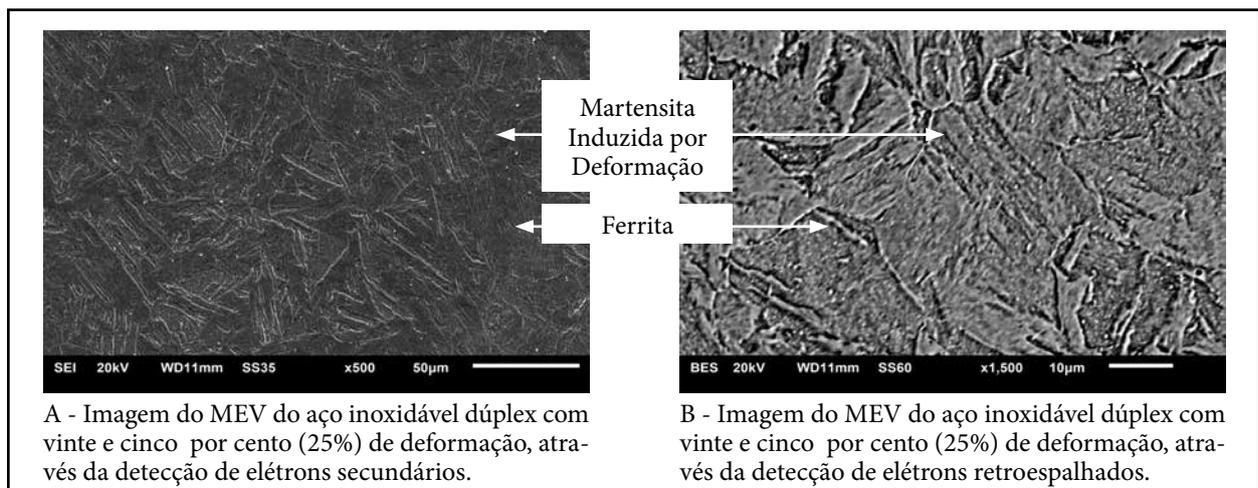


Figura 18 - Amostra de aço inoxidável dúplex deformada em vinte e cinco por cento (25%): A- região 1 e B: região 2

Fonte: Os autores (2017).



A - Imagem do MEV do aço inoxidável dúplex com vinte e cinco por cento (25%) de deformação, através da detecção de elétrons secundários.

B - Imagem do MEV do aço inoxidável dúplex com vinte e cinco por cento (25%) de deformação, através da detecção de elétrons retroespalhados.

Figura 19 - Imagens do MEV do aço dúplex com deformação de vinte e cinco por cento (25%): A- detecção de elétrons secundários e B- detecção, através elétrons retroespalhados.

Fonte: Os autores (2017).

Finalizando, detectou-se, por microscopia óptica e MEV, a presença de MID nas amostras deformadas em trinta por cento (30%), além de elevado encruamento da ferrita. As figuras 20 e 21 evidenciam esse comportamento.

A figura 20 demonstra a imagem em microscopia óptica do aço inoxidável dúplex deformada na taxa de trinta por cento (30%).

As imagens feitas no MEV, para as amostras com trinta por cento (30%) de deformação, estão representadas na figura 21.

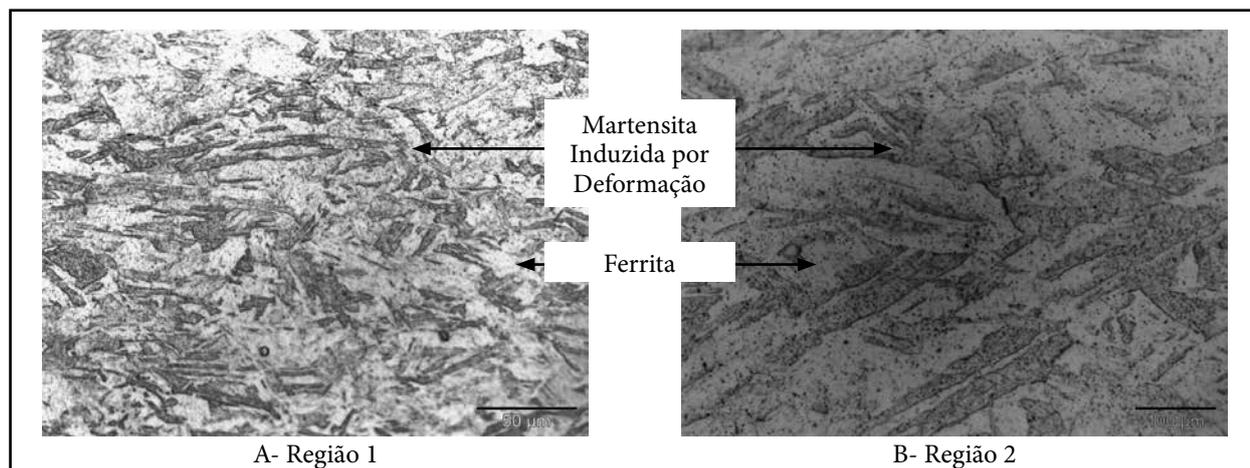


Figura 20 - Amostra de aço inoxidável dúplex deformada em trinta por cento (30%): A- região 1 e B: região 2
 Fonte: Os autores (2017).

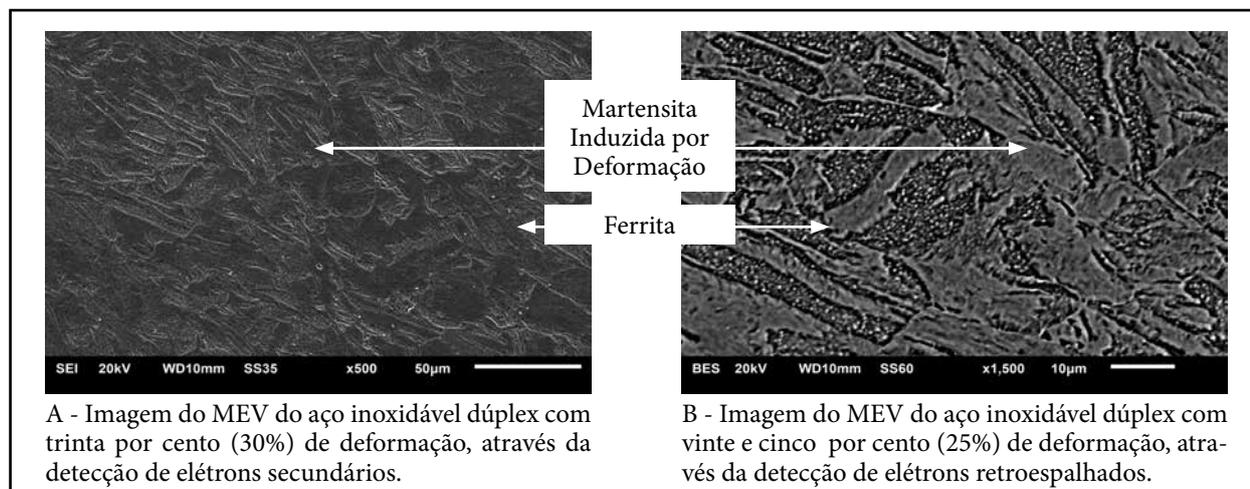


Figura 21 - Imagens do MEV do aço inoxidável dúplex com deformação de trinta por cento (30%): A- detecção de elétrons secundários e B- detecção, através de elétrons retroespalhados
 Fonte: Os autores (2017).

A confirmação de que a deformação de trinta por cento (30%) apresenta uma distribuição maior de martensita induzida por deformação pode ser identificada, tanto por microscopia óptica, como por microscopia eletrônica de varredura (CHOI *et al.*, 2016).

As microdurezas dos materiais metálicos podem ser analisadas por perfil de microdureza, dependendo

das condições em que os mesmos se encontram, verificando-se variações relacionadas a diferentes fases do substrato. No caso dos aços inoxidáveis dúplex, podem ser encontradas ferrita, austenita e MID (DAMIN; GENEROSO; CAVILHA NETO, 2017).

A figura 22 demonstra as indentações realizadas para medir a dureza das amostras sem deformação e com trinta por cento (30%) de deformação.

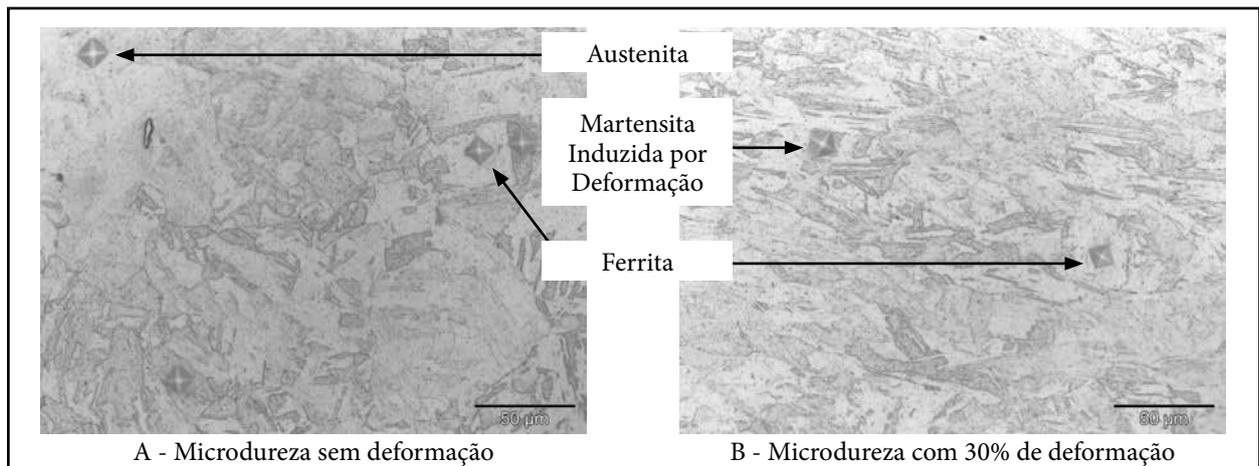


Figura 22 - Microdureza das amostras: A - sem deformação e B - com trinta por cento (30%) de deformação
 Fonte: Os autores (2017).

Um aumento significativo de microdureza com o aumento da deformação verificou-se, conforme a figura 23, sendo o aumento da mesma associada à presença de MID e encruamento da ferrita (BREDA *et al.*, 2017).

Quando se compara a dureza da segunda fase, é possível afirmar que a mesma não é austenita, pois a dureza se tornou maior, quando comparada com a ferrita. Esse fato confirma o surgimento da martensita induzida por deformação (KANG *et al.*, 2017).

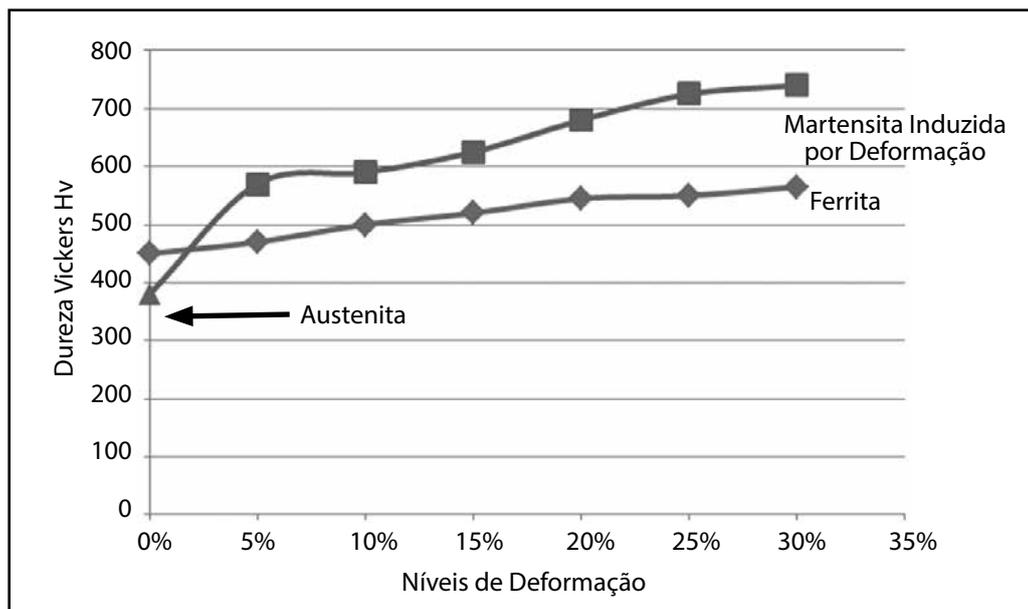


Figura 23 - Valores de dureza ao longo das deformações
 Fonte: Os autores (2017).

5 Conclusão

Através dos ensaios de dureza realizados, concluiu-se que, a partir de cinco por cento (5%) de deformação, o aço inoxidável dúplex forma a martensita induzida por deformação. Percebeu-se também um aumento significativo

na microdureza do aço inoxidável dúplex, com a formação da MID, sendo assim, é possível afirmar que o aumento da microdureza foi, diretamente, relacionada à presença de MID.

Ao nível de cinco por cento (5%) de deformação, não foi possível observar a martensita

induzida por deformação no aço inoxidável dúplex, com utilização de microscopia óptica, somente sendo possível essa observação, após a deformação equivalente a quinze por cento (15%). Em todos os níveis de deformação, foi possível detectar a martensita induzida por deformação, com a utilização de MEV.

O desenvolvimento de aços inoxidáveis dúplex, associados à transformação da MID, representa um fator tecnológico importante para a melhora das propriedades mecânicas dessa classe de aços.

Referências

- AGUIAR, D. J. M. **Estudo da formação e reversão de martensita induzida por deformação na austenita de dois aços inoxidáveis dúplex**. 2012. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- BREDA, M. *et al.* Strain-induced martensite detection methods in cold-rolled duplex stainless steels. **Materials Performance and Characterization**, v. 6, n. 3, 2017.
- CASTRO, C. S. B. **Efeito da adição de cobre nas propriedades mecânicas de aços inoxidáveis austeníticos**. 2003. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- CHOI, J. Y. *et al.* Effects of the strain rate on the tensile properties of a TRIP-aided duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 666, p. 280-287, 2016.
- DAMIN, K. V. S.; GENEROSO, D. J.; CAVILHA NETO, F. Aços inoxidáveis dúplex: uma breve visão. **Revista Liberato**, v. 18, n. 29, 2017.
- DREHER, F. M. **Avaliação da estampagem profunda de cubas em aço inox AISI 304**. 2016. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.
- ECHEVERRI, E. A. A. **Análise numérica e experimental de um aço TRIP submetido aos processos de estampagem a quente e têmpera e partição (Q&P)**. 2017. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- GAUSS, C. **Evolução microestrutural do aço inoxidável dúplex UNS 532205 durante laminação a frio e posterior recozimento**. 2015. 167 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION. **Practical guidelines for fabrication of duplex stainless steel**. London, 2009. 64 p.
- KANG, J. Y. *et al.* Effect of austenitic texture on tensile behavior of lean duplex stainless steel with transformation induced plasticity (TRIP). **Materials Science and Engineering A**, v. 681, p. 114-120, 2017.
- MARESCA, F.; CURTIN, W. A. The austenite/lath martensite interface in steels: structure, athermal motion, and in-situ transformation strain revealed by simulation and theory. **Acta Materialia**, v. 134, p. 302-323, 2017.
- MOALLEMI, M.; ZAREI-HANZAKI, A.; BAGHBADORANI, H. S. Evolution of microstructure and mechanical properties in a cold deformed nitrogen bearing TRIP-assisted duplex stainless steel after reversion annealing. **Materials Science and Engineering A**, v. 683, p. 83-89, 2017.
- PADILHA, A. F.; AGUIAR, D. J. M.; PLAUT, R. L. Duplex stainless steels: a dozen of significant phase transformations. **Defect and Diffusion Forum**, v. 322, p. 163-174, 2012.
- SALES, L. S. **Envelhecimento na martensita induzida por deformação em aços tipo AISI 304**. 2006. 89 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- SANTOS, T. F. A.; ANDRADE, M. S.; CASTRO, A. L. Efeito da taxa de aquecimento na reversão da martensita induzida por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 1, p. 53-58, 2009.

SATO, K.; SUEYOSHI, H.; YAMADA, K. Characterization of complex phase steel using backscattered electron images with controlled collection angles. **Microscopy**, v. 64, n. 5, p. 297-304, 2015.

SILVA, A. P. **Estudo da transformação da austenita retida induzida por deformação, de um aço AISI4340 com estrutura multifásica.** 2006. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

