

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AÇO MULTIFÁSICO TRIP ATRAVÉS DE DEFORMAÇÕES GRADUAIS.

Leonidas Cayo Mamani Gilapa, leonidas@ifsc.edu.br¹

Rubens Hesse, Rubens.hesse@ifsc.edu.br²

Emerson Luis de Oliveira, emerson.oliveira@ifsc.edu.br²

Kelly Patricia Dias Schwede, Kelly.dias@ifsc.edu.br²

^{1,2}Instituto Federal de Santa Catarina, Rua pavão 1377, Costa e Silva, Joinville S.C.

Resumo. Nas ultimas décadas foram desenvolvidos materiais para atender às mais diversas exigências do setor produtivo industrial, com destaque para a utilização de chapas metálicas com espessura reduzida sem perda das propriedades mecânicas. Especial interesse tem se dado aos aços multifásicos devido a grande gama de aplicações, exploradas pela utilização desses aços com efeito TRIP (plasticidade induzida por transformação de fases). Estes aços oferecem uma relação atraente entre resistência e ductilidade devido à sua microestrutura complexa. Neste sentido o objetivo deste trabalho foi a caracterização microestrutural (microscopia ótica) e de microdureza de um aço multifásico (TRIP 780) quando submetido a esforços graduais. Os corpos de prova (ABNT ISO 6892) sofreram deformações progressivas através do ensaio de tração, os resultados mostraram um aumento da dureza (aproximadamente 30%) e da martensita com o aumento da deformação.

Palavras-chave: deformação, aços TRIP, caracterização.

1. INTRODUÇÃO

Nos anos de 1990, a indústria siderúrgica mundial iniciou o desenvolvimento contínuo de novos aços com características cada vez mais adequadas às aplicações requeridas, especialmente, pela indústria automotiva. Estes aços foram englobados em um só grupo chamado de Aços Avançados de Alta Resistência ou *Advanced High Strength Steels* – AHSS (Tigrinho, 2011). Tratam-se de aços de baixo teor de carbono na faixa de 0,05 a 0,15%, com adições de manganês de 1,0% a 1,5% e silício em torno de 0,04%.

Estes aços apresentam uma microestrutura constituída de ferrita, austenita (fase macia) e quantidades variáveis de bainita e martensita (fase dura). A microestrutura diferenciada garante a esses aços maior resistência do que os aços convencionais de alta resistência (HSS), aliada a uma boa ductilidade, aumento da absorção de energia, melhorando a resistência ao impacto (Lajarin *et al*, 2012). Na Fig. (1) pode ser observada a relação apresentada por Dias (2013), entre tensão limite de resistência e alongamento total para vários tipos de aços HSS e AHSS.

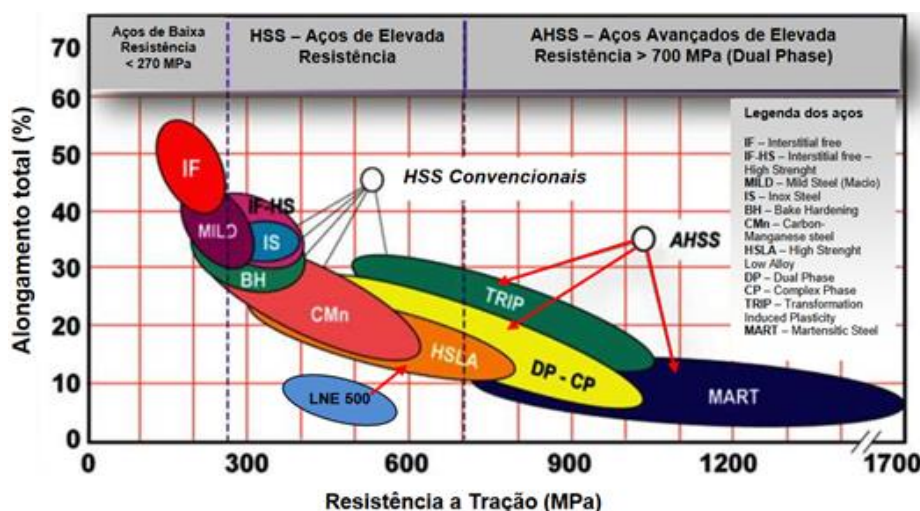


Figura 1. Relação de alongamento e limite de resistência para aços HSS e AHSS (Dias, 2013)

Os aços AHSS apresentam como característica principal alta capacidade de encruamento devido à baixa relação entre o limite de escoamento e o de resistência, que permitem o controle da resistência e, simultaneamente, o controle do comportamento da deformação, ou seja, da forma das curvas de tensão-deformação (Matlock *et al*, 2011; Murari,

2009). Estes aços apresentam um espectro de resistência mecânica a tração que pode variar normalmente de 450 a 1500 Mpa (Faria Neto *et al*, 2012) conforme Fig. (1), que ainda apresenta os valores de alongamento para aços HSS e AHSS.

Dentre os aços AHSS, o aço multifásico TRIP (*Transformation-induced-plasticity* ou plasticidade induzida por transformação de fases) é um dos principais materiais utilizados, pois possuem microestrutura peculiar, formada por austenita retida (em torno de 5 a 12%) em uma matriz primária ferrítica (Gajda *et al*, 2008), apresentam ainda quantidades variadas de martensita e bainita. A Fig. (2) mostra esquematicamente a distribuição das diversas fases do aço TRIP.

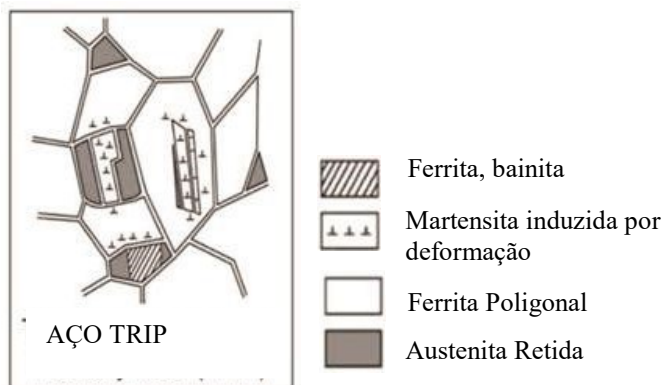


Figura 2. Distribuição esquemática das fases presentes num aço TRIP. (adaptado de Gajda *et al*, 2012)

Esta microestrutura aliada ao efeito TRIP (transformação da martensita induzida por deformação) partindo da austenita metaestável em aços multifásico de baixa liga com concentrações mais altas de Si e Mn, fornece ao material altos níveis de resistência mecânica, baixo limite de escoamento, alta ductilidade, o que resulta em conformabilidade similar aos aços de baixa resistência, e um alto expoente de encruamento, proporcionando assim maiores níveis de deformação e uma alta resistência após o processo de conformação, fato que não era possível, até então, com a aplicação de aços convencionais (Tigrinho, 2011). A Fig. (3) apresenta os valores de encruamento “n” em função do limite de resistência para vários aços de alta resistência mecânica, observa-se que os aços bifásicos apresentam valores maiores de “n” para uma ampla faixa de limite de resistência (Gorni, 2008; Moraes, 2014).

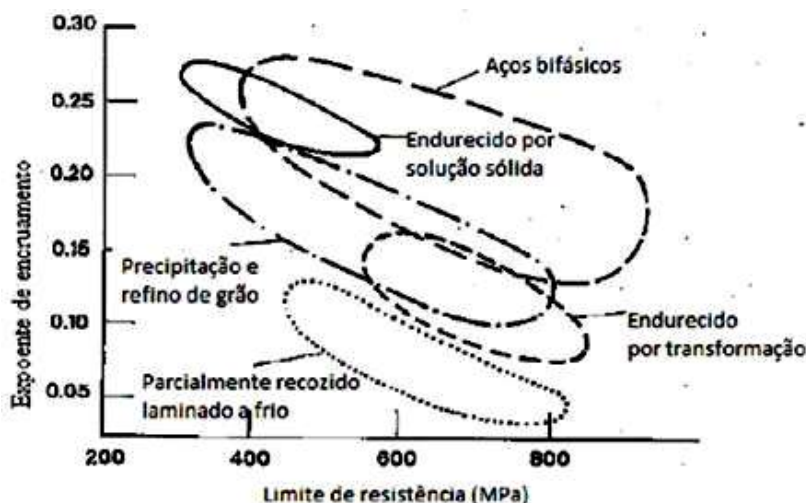


Figura 3: Relação do expoente de encruamento com limite de resistência para vários tipos de aços. (Moraes, 2014)

Galan *et al*, (2012) relata propriedades mecânicas ótimas para aços TRIP contendo austenita retida com uma fração de volume na faixa de 8% a 15%. A estabilidade da austenita retida depende dos seguintes parâmetros: da composição da austenita retida, da sua energia intrínseca de falha de empilhamento (ISFE), do estado de tensão, da resistência da austenita e presença de outras fases em sua vizinhança, da sua morfologia, tamanho e distribuição da austenita retida na microestrutura.

A transformação de austenita para martensita pode ocorrer de três formas, a primeira denominada transformação espontânea (térmica), ocorre quando o material é resfriado numa temperatura abaixo do início de formação da martensita (M_s), a segunda denominada nucleação assistida por tensão, onde a martensita é nucleada quando a tensão

aplicada está na região de deformação elástica da austenita e terceira denominada nucleação induzida por deformação, aqui a martensita nucleia, a partir do início do limite de escoamento da austenita (Gilapa 2011), a Fig. (4) mostra esquematicamente as três formas de transformação da austenita para martensita (Galan *et al*, 2012)

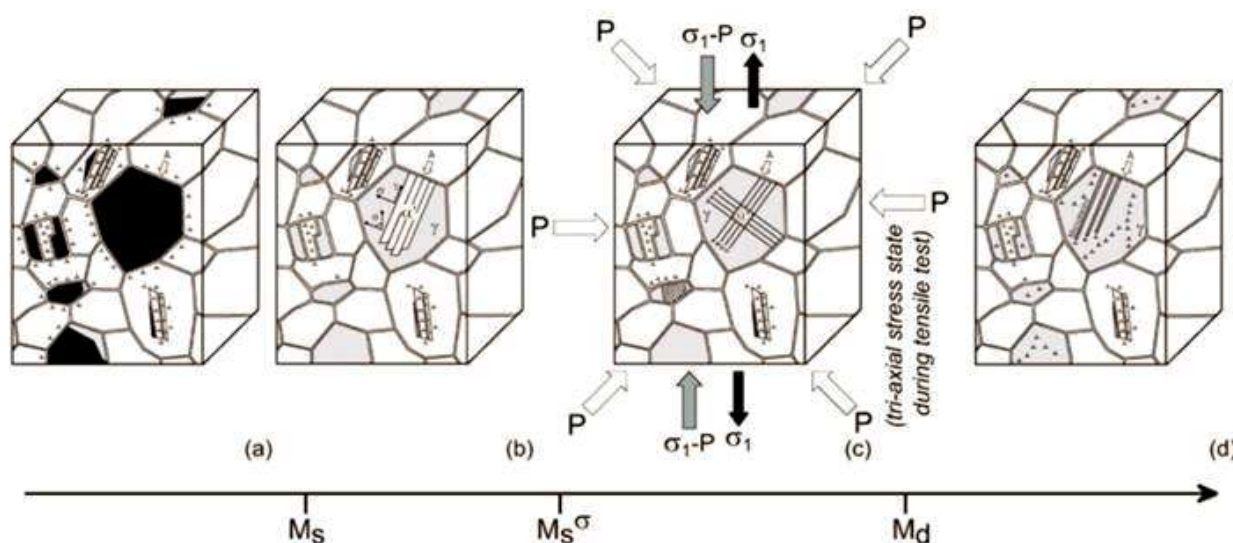


Figura 4: diagrama esquemático mostrando (a) formação da martensita espontânea, (b) martensita induzida por tensão, (c) martensita induzida por deformação e (d) formação da martensita devido ao deslizamento dos planos e formação de microtwins. (adaptado de Galan *et al*, 2012)

Como o comportamento mecânico dos materiais é fortemente dependente da microestrutura (tamanho de grão, frações volumétricas das diversas fases, distribuição geométrica das fases, entre outras) (Galan *et al*, 2012) o que torna importante a caracterização do material.

A maioria das análises metalográficas tem por finalidade correlacionar estrutura e propriedades com a quantidade das frações volumétricas das fases presentes no material, assim como tamanho de grão, morfologia e distribuição das fases, a precisão nas análises depende fortemente da preparação e ataque das amostras. O ataque químico tem por objetivo modificar o relevo da superfície para identificação de uma ou outra fase. No entanto estes ataques não mostram satisfatoriamente certos constituintes, como por exemplo, a austenita fase de fundamental importância na caracterização de aços multifásicos (Anazawa *et al*, 2010).

O ataque químico com nital normalmente é utilizado para revelar a microestrutura de aços carbono, como contornos de grão e diferenciam basicamente as fases em duas tonalidades de cinza, a mais clara correspondente a ferrita e austenita retida e a mais escura correspondente a bainita, martensita e perlita. Este tipo de ataque não permite a identificação de várias fases que coexistem simultaneamente, como é o caso de aços multifásicos.

O ataque realizado com o reagente LePera permite identificar a bainita que aparece com uma cor marrom escura, a ferrita pode aparecer com coloração azul ou marrom clara e a martensita e austenita retida aparecem com aparência mais clara (Anazawa *et al*, 2010). A Fig. (5) apresenta a microscopia ótica de um aço 300M, na Fig. (5a) apresenta a microscopia ótica utilizando o reagente nital, a Fig. (5b e c) a microscopia ótica com reagente LePera. (Anazawa *et al*, 2010).

Os aços multifásicos TRIP possuem uma microestrutura formada pelas fases ferrita, bainita, martensita e austenita, a mesma que confere ao material uma maior resistência mecânica se comparados com os aços avançados de alta Resistência. Esta microestrutura fornece ao material um alto grau de encruamento e a transformação da austenita em martensita por deformação. Assim o presente trabalho utilizou técnicas de microscopia, micro dureza e deformações graduais através do ensaio de tração para avaliar o aumento das propriedades mecânicas do aço TRIP quando submetido à deformação.

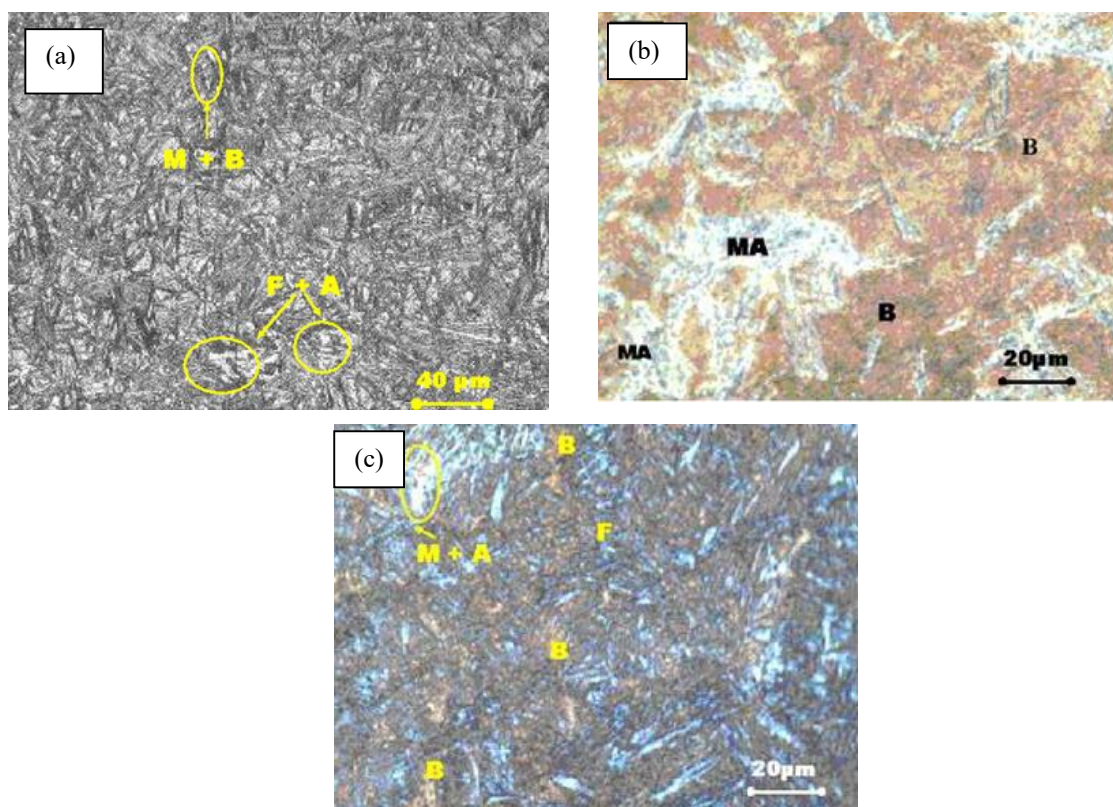


Figura 5: micrografias obtidas por microscopia ótica, (a) ataque com nital mostrando as fases martensita, bainita e ferrite, austenita, (b) ataque com Le Pera mostrando as fases martensita e bainita e (c) ataque com Le Pera mostrando as fases martensita, austenita, bainita e ferrita (Anazawa *et al*, 2010)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no laboratório de materiais do IFSC Joinville. A chapa utilizada foi o aço TRIP 780 fornecido pela Vega do sul (Arcelor Mittal Brasil), material utilizado atualmente nas linhas de produção de montadoras de veículos comerciais. Este aço foi fornecido com comprimento e largura de 1000 mm e espessura 1,2mm, a composição química fornecida pelo fabricante é mostrado na Tabela (1).

Tabela 1: composição química do aço TRIP 780 (% em massa)

Elemento de liga	C	Mn	P	S	Cu	Cr+Mo	Ni
% massa	0,32	6,7	0,12	0,015	0,2	0,6	0,5

Para o estudo da variação das propriedades mecânicas foram realizadas deformações graduais em corpos de prova (CP) para ensaio de tração de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892 mostrado na Fig. (6). Os CPs foram usinados através do processo de eletroerosão a fio.

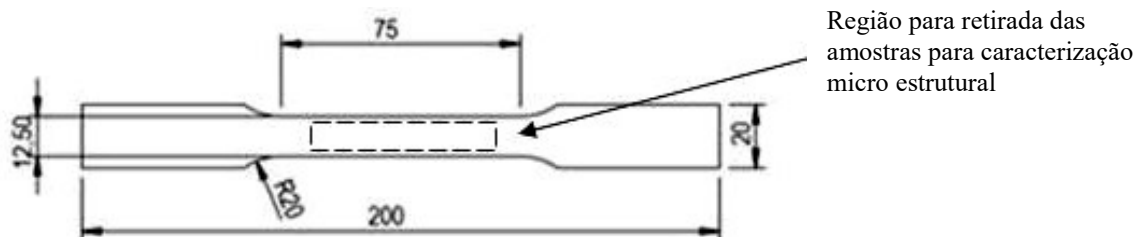


Figura 6: corpo de prova

O equipamento utilizado para realizar as deformações graduais foi a máquina universal de tração uniaxial da marca EMIC com capacidade de 10.000 kgf, a velocidade utilizada no ensaio foi igual a 5mm/min., e temperatura controlada do laboratório de 23°C.

A fim de estabelecer critérios para análise da dureza com o aumento da deformação, foram usinados 8 CPs de tração, o primeiro CP foi deformado até sua ruptura total, resultando o alongamento total igual a 21,5 mm. Através deste resultado, dividiu-se o valor de 21,5mm pela quantidade de CDPs disponíveis para realização dos experimentos, resultando em 7 níveis de incrementos para o alongamento e intervalos de 2,7mm. Desta forma, os CDPs seguintes foram alongados nos seguintes valores: 2,7mm; 5,4mm; 8,1mm; 10,8mm; 13,4mm; 16,1mm; 18,8mm.

A medida de micro-dureza foi realizada utilizando o micro-durômetro modelo FM-800, da empresa Future-Tech Corp, adotando no procedimento experimental uma carga de 300g e duração da aplicação de 10 segundos.

A análise metalográfica foi realizada por meio de microscopia ótica, as amostras dos corpos de prova foram retirados através do processo de eletroerosão a fio, a região retiradas para análise foi ilustrado na Fig.(6).

As amostras seccionadas foram submetidas ao embutimento a frio, a fim de evitar alterações da microestrutura com a temperatura. As amostras embutidas e limpas foram lixadas com lixa d'água na sequência granulométrica 320, 400, 600 e 1200 mesh utilizando a técnica convencional de preparação. O polimento foi realizado com suspensão de sílica coloidal de 0,5µm, sobre um pano para polimento de 8". Após todo o processo de polimento, a amostra foi limpa com algodão embebido em álcool etílico, visando a remoção da sílica na superfície do material. Em seguida, a amostra foi seca com um jato de ar frio.

Na análise metalográfica, foram realizados os ataques químicos apropriados e a posterior análise por microscopia óptica, seguida da aquisição das micrografias em formato digital. Para os ataques químicos, foram empregados os reagentes Nital e LePera. Pela utilização de Nital 2% o ataque tem como finalidade revelar os contornos da microestrutura, propiciando o contraste entre as fases claras e escuras, onde, para os aços multifásicos as fases claras indicam a presença de ferrita juntamente com austenita retida e as fases escuras de martensita com bainita. Pela utilização do reagente Le Pera (1:1), que é composto por uma solução de (1) para (1) de Picral 4% (4% de ácido pícrico em solução de álcool etílico) com metabissulfeto de sódio 1% em solução aquosa, buscou-se a diferenciação entre as estruturas que não se destacam mediante o uso do reagente Nital. Assim, para o aço multifásico é possível determinar as estruturas ferríticas, bainíticas e martensíticas que se apresentam juntamente com as estruturas de austenita retida.

3. RESULTADOS

A Fig. (7) ilustra os resultados de micrografias do aço TRIP 780, a Fig. (7a) mostra a micrografia do material como recebida da linha de produção do fornecedor, nesta imagem, é possível perceber um leve domínio das regiões claras, correspondentes às fases de ferrita e austenita retida, as regiões escuras que correspondem às fases de martensita e bainita, o fato de uma tonalidade representar duas fases mostra a menor eficiência do ataque com reagente Nital. A Fig. (7b) mostra a micrografia com deformação máxima (21,5mm), observa-se a deformação das fases cuja orientação segue o sentido da deformação.

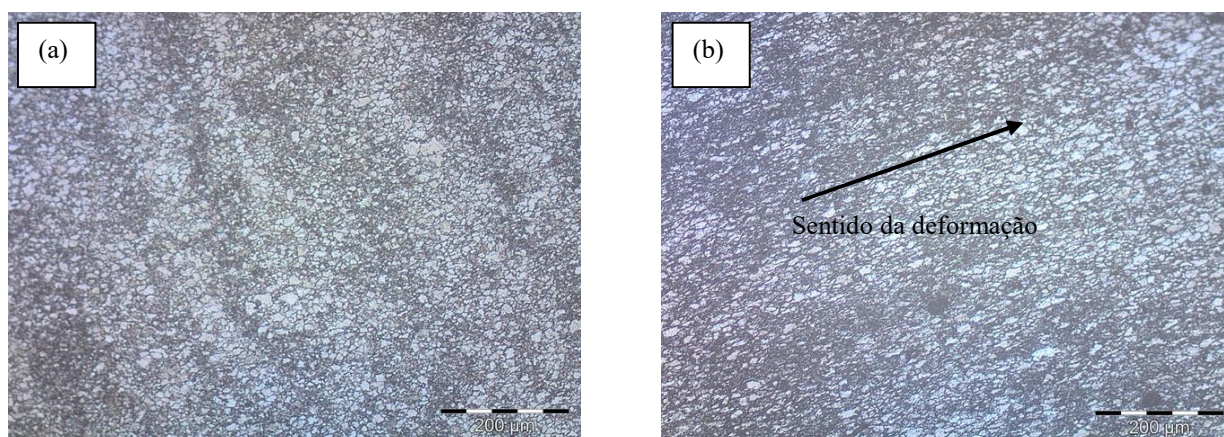


Figura 7: microestrutura do aço TRIP 780 mostrando as regiões claras e escuras correspondentes as fases moles e duras respectivamente (a) como recebido, (b) com deformação máxima.

A Fig. (8) apresenta resultados das amostras que sofreram ataque com o reagente Le Pera. As Fig. (8a) á (8d) apresentam a micrografia para o material sem deformação, com 2,7mm, com 8,1mm e deformação máxima respectivamente. O reagente Le Pera permite identificar algumas fases, como a ferrita (matriz) que pode aparecer com uma coloração clara, representado por grãos poligonais mostrados na Fig. (8a) (Ehrhardt *et al*, 2004). A diferença de tonalidade apresentadas nas figuras podem ser devido à pequena diferença nos tempos de ataque. A coloração e o

tamanho dos grãos encontra-se de acordo com a literatura (Kantovicki, 2005). A bainita que aparece com uma tonalidade marrom mais escura, se mostra com um formato levemente acicular ou com formato intermediário entre a ferrita e martensita mostrado na Fig. (8d) (Anazawa *et al*, 2010), finalmente a Fig. (8d) mostra a martensita que aparece no contorno de grão da ferrita, formando ilhas escuras, local onde são nucleadas as ripas de martensita partindo da austenita retida (Kantovicki, 2005).

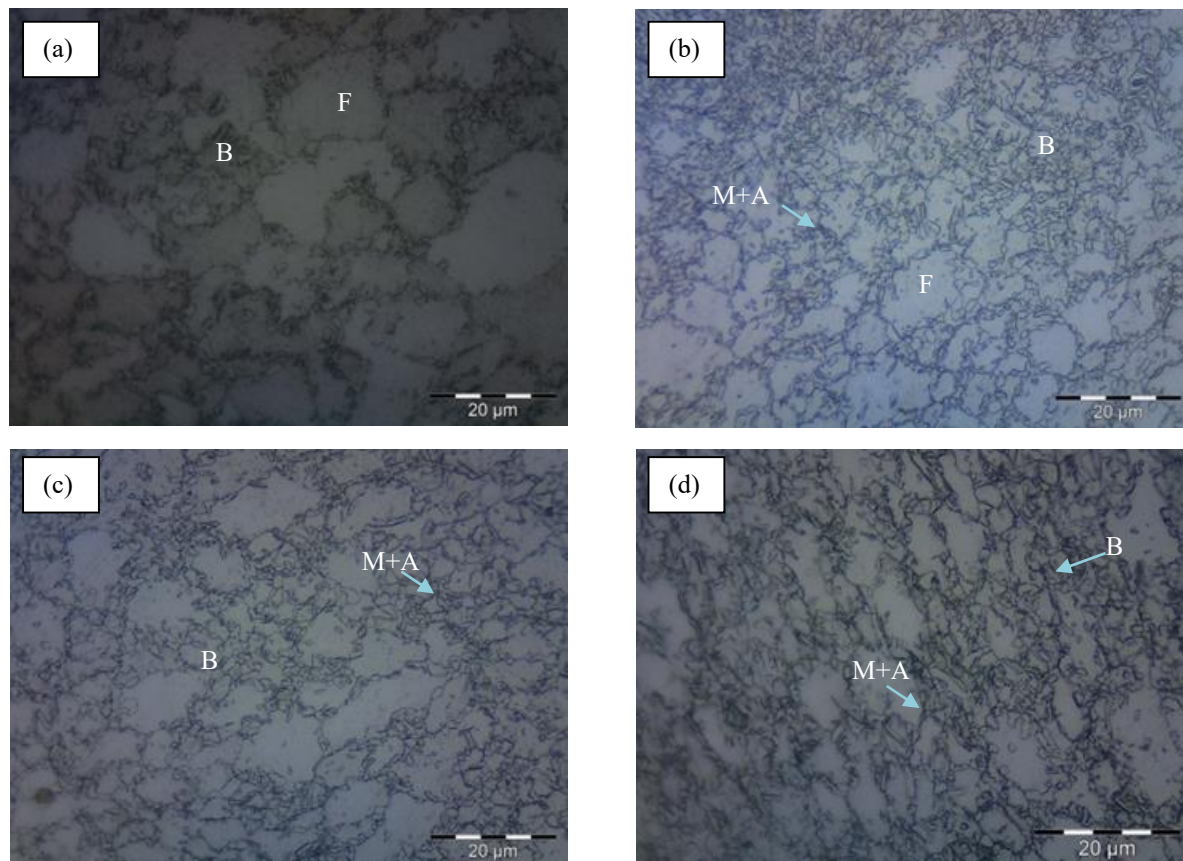


Figura 8: micrografias com 1000 x (a) sem deformação, (b) com 2.7mm de deformação, (c) com 8.1mm de deformação e (d) ruptura. F= ferrita, B= bainita e M+A= martensita e austenita retida.

As fases mostradas na Fig. (8) foram identificadas por comparação com a literatura especificada. Observa-se ainda na Fig. 8 (a á d) uma deformação progressiva dos grãos no sentido da deformação. Pode ser notado ainda que a um incremento da fase martensítica com o incremento da deformação.

Para medição da microdureza, as amostras foram obtidas utilizando o mesmo processo, dimensões e local semelhante aos obtidos para metalografia. Foram realizadas 5 medições para cada amostra, os valores apresentados correspondem a média das cinco leituras. Cabe ressaltar que nas medições realizadas os valores obtidos tiveram uma variação máxima de 10%, a Fig. (9) apresenta os valores obtidos.

Os resultados apresentados na Fig. (9) demonstram que, ocorre um aumento da microdureza no material à medida que aumenta sua deformação, o material deformado com valor de 2,7mm os resultados demonstram uma microdureza de 80 Hv representado menor valor registrado. À medida que a deformação vai para seu valor máximo de 21,5mm o resultado de micro dureza aumenta para 120 Hv representando uma diferença de 50% entre a menor e maior deformação.

A aplicação de tensões ou deformações num material produz um aumento na quantidade de defeitos cristalinos na austenita, especialmente do número de discordâncias, este aumento, esta relacionado com o arranjo espacial e deslizamento o que provoca a interação das discordâncias e das bandas de cisalhamento, aumentando assim o número de sítios para o início da transformação martensítica (Gorni, 2008). A formação dos mecanismos de endurecimento e formação de martensita por deformação pode ser observado nas Fig. 8 de (a para d), onde é mostrada uma deformação do grão no sentido da aplicação da deformação, consequentemente um aumento do encruamento e dos sítios favoráveis à transformação de fases.

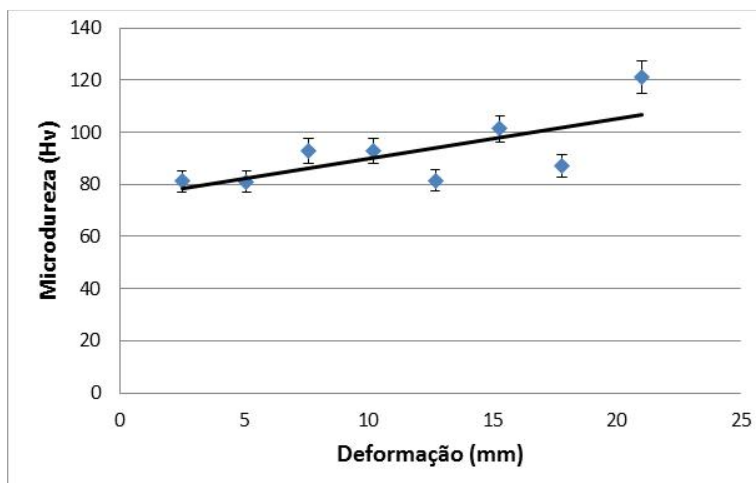


Figura 9: medida da microdureza das amostras com deformação progressiva.

A Fig. (9) mostra uma tendência crescente na dureza com a deformação dos corpos de prova, este aumento da dureza está diretamente relacionado com o aumento das propriedades mecânicas. Nos aços AHSS este aumento das propriedades mecânicas está relacionado com a formação da martensita e pelo endurecimento do material (encruamento) por deformação.

As discordâncias criadas pela transformação martensítica na ferrita também possuem papel importante na ductilidade destes aços, pois também contribuem para o encruamento (Gorni, 2008). O alto índice de encruamento dos aços TRIP permite uma distribuição mais uniforme das deformações na presença de um gradiente de tensões.

4. CONCLUSÕES

Com base nos ensaios realizados podemos considerar as seguintes conclusões:

Com base nos resultados apresentados, através das micrografias do aço TRIP 780 percebe-se que, na deformação dos CPs através da deformação máxima ocorre a mudança de fase do material, o material com microestrutura ferrita e austenita em maior quantidade após sua deformação total passou a ser F= ferrita, B= bainita e M+A= martensita e austenita retida.

Com relação à microdureza dos materiais, percebe-se que, comparando o menor valor de deformação (2,7mm) e máximo de (21,5mm) existe um aumento médio de 30% na microdureza nos corpos de provas em estudo.

A relação de deformação de (2,7mm para 5,4mm) e (8,1mm para 10,8mm) os resultados demonstraram não existir diferença significativa na microdureza permanecendo nos valores relativamente próximos.

Os valores de microdureza nas deformações de (13,4mm para 16,1mm) e (18,8mm para 21,5) demonstrarão um comportamento diferente dos demais experimentos, apresentando um aumento na microdureza de 50%. Sugere-se que, este fenômeno ocorreu devido a um aumento na quantidade de defeitos na austenita, especialmente do número de discordâncias, este aumento, está relacionado com o arranjo espacial e deslizamento o que provoca a interação das discordâncias e das bandas de cisalhamento, aumentando assim o número de sítios para o início da transformação martensítica conforme presenciado por (Gorni, 2008).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pelo fornecimento de bolsas de iniciação científica.

6. BIBLIOGRAFIA

- Tigrinho, L. M. V., "Análise da fratura de chapas de aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões". Dissertação de doutorado, PPGEM UFPR, Curitiba, agosto, 2011.
- Dias, A. N. O., "Avaliação das propriedades mecânicas de um aço bifásico com diferentes microestruturas". Dissertação de mestrado, PPGEM UNIFEI, Itajuba, Julho 2013.
- Matlock, D. K., Speer, J. G., Moor, E., Gibbs, P. J., "Recent developments in advanced High strength sheet steels for automotive applications: an overview". *Jestech*, 15(1), 2012, pp 1 – 12.
- Murari, F. D., "Cinética de envelhecimento de aços dual-phase de baixa resistência mecânica laminados a frio". Dissertação de doutorado PPGEM UFMG, Belo horizonte, 2009.

- Faria Neto, A. R., Harada, A., Pereira, M. S., “Propriedades mecânicas relacionadas com a microestrutura de aços avançados destinados a indústria automobilística”. VI conferência brasileira sobre temas de tratamento térmico, Atibaia, junho 2012, pp 403 – 414.
- Gajda, B., Lis, A. K., “A study of microstructure and phases transformation of CMnAlSi TRIP steel” Journal of Achievements in materials and Manufacturing engineering, vol. 31, pp. 646 - 653.
- Gorni, A. A., “Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânica”. Corte e conformação de metais, São Paulo, 2008, pp 26 – 57.
- Moraes, E. A., “Influência das temperaturas de recozimento contínuo na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aço bifásico galvanizado da classe de resistência de 980 MPa.” Dissertação de mestrado, PPGEM, UFMG, dezembro de 2014.
- Galan, J., Samek, L., Verleysen, P., Verbeken, K., Houbaert, Y., “Advanced High strength steels for automotive industry”. Revista de metalurgia 48(2), março – abril 2012, p 118 – 131
- Gilapa, L. C. M., “Efeito do teor de cobre e dos caminhos de deformação na conformabilidade e na transformação da martensita induzida por deformação em aços inoxidáveis austeníticos”. Dissertação de Doutorado, PPGEM, UFSC, setembro 2011.
- Anazawa, R. M., Abdalla, A. J., Hashimoto, T. M., Pereira, M. S., Carrer, G. R., “Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica”. VI congresso Nacional de Engenharia Mecânica, COBEM 2010, Campina Grande, Paraíba, 18 – 21 Agosto.
- Kantoviski, A. R., Caracterização mecânica e microestrutural de aços de alta resistência e baixa liga TRIP 800”. Dissertação de mestrado, PPGEM, UTFPR, Curitiba, Agosto 2005.
- Lajarin, S. F., Malveira, N. V., Marcondes, P.V.P., “Características elasto-plásticas e microestruturais dos aços de alta resistência”. 67 congresso da ABM, 2012, pp 2917 – 2028.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

MICROESTRUTURAL CHARACTERIZATION OF MULTIPHASE STEEL TRIP THROUGH GRADUAL DEFORMATIONS..

Leonidas Cayo Mamani Gilapa , leonidas@ifsc.edu.br¹

Rubens Hesse, Rubens.hesse@ifsc.edu.br²

Emerson Luis de Oliveira, emerson.oliveira@ifsc.edu.br²

Kelly Patricia Dias Schwede, Kelly.dias@ifsc.edu.br²

^{1,2}Instituto Federal de Santa Catarina, Rua pavão 1377, Costa e Silva, Joinville S.C.

Abstract. In recent decades, materials have been developed to meet the most diverse requirements of the industrial production sector, with emphasis on the use of metal sheets with reduced thickness without loss of mechanical properties. Particular interest has been given to multiphase steels due to a range of applications that are exploited by the use of these TRIP (deformation induced martensitic transformations) steels. These steels offer an attractive relationship between strength and ductility due to their complex microstructure. In this sense the objective of this work was the microstructural characterization (optical microscopy) and microhardness of a multiphase steel (TRIP 780) when subjected to gradual efforts. The test specimens (ABNT ISO 6892) underwent progressive deformations through the tensile test, the results showed an increase in hardness (approximately 30%) and martensite with increased deformation.

Key words: deformation, TRIP steels, characterization.