

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO INTERCRÍTICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AÇO BIFÁSICO BAIXO CARBONO¹

Rodrigo Magnabosco²
Arnaldo Forgas Júnior³

Resumo

Esta pesquisa tem como objetivo principal investigar a influência da temperatura de recozimento intercrítico (TR) no comportamento mecânico de um aço bifásico com baixo teor de carbono, analisando principalmente a relação limite de resistência e ductilidade, em virtude de sua emergente importância na indústria automobilística, onde é necessário aliar essas duas propriedades. Para isso, foi adquirida uma chapa de aço bifásico comercial. Com o objetivo de se ter diferentes frações em volume de martensita, essa chapa foi tratada termicamente em quatro diferentes temperaturas (715, 755, 780 e 800°C) dentro da faixa de temperaturas da região intercrítica. Realizaram-se ensaios de tração e impacto em amostras do material após o tratamento térmico de recozimento intercrítico. Verifica-se que, com o aumento da temperatura de recozimento intercrítico a fração em volume de martensita aumenta. Os limites de resistência e de escoamento também aumentam com a TR, porém de forma diferente. A amostra tratada termicamente na menor temperatura de recozimento intercrítico apresenta uma maior energia absorvida (patamar superior) em relação às outras amostras. Já as temperaturas de transição dúctil – frágil (TTDF) apresentam valores abaixo de -66°C, para todas as amostras. Para a discussão, é avaliada cada propriedade mecânica em relação à fração de martensita obtida (o tamanho de grão não apresentou variação considerável) gerando assim parâmetros de processamento desse aço de forma a se maximizar as propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Aço bifásico; Propriedades mecânicas; Recozimento intercrítico.

INFLUENCE OF THE INTERCRITICAL ANNEALING TEMPERATURE ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF A LOW CARBON DUAL-PHASE STEEL

Abstract

This work has the main purpose to investigate the influence of the intercritical annealing temperature of a dual-phase steel (DP) with low carbon on the mechanical behavior, specially tensile strength and ductility, due to its emergent importance in the automotive industry, where it is necessary to unite these two properties. For this reason a commercial dual-phase steel sheet was obtained. With the purpose to obtain different volume fraction of martensite, this steel plate was heat treated at four different temperatures (715, 755, 780 and 800°C) inside the intercritical region. Tension and Impact tests were performed. It has observed that increasing the annealing temperature lead to increasing in the volume fraction of martensite. The tensile strength and the yield strength also have increased when the annealing temperature has increased. The specimen heat treated in the lowest temperature showed the higher absorbed energy (upper shelf) than the other specimens, and the ductile-to-brittle transition temperature shows values below -66°C for all specimens. For the discussion, it is evaluated each mechanical property according to the volume fraction of the martensite (the grain size did not show any variation) to have more information and parameters to process these steel sheets and to maximize the mechanical properties.

Key-words: Dual-phase steel; Mechanical properties; Intercritical annealing.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, rodrmagm@fei.edu.br

³ Mestrando em Materiais e Processos pelo Centro Universitário da FEI, forgas.jr@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Os aços bifásicos com baixo carbono têm microestrutura composta por duas fases, uma matriz ferrítica e ilhas de martensita na fração de até 40% distribuídas nessa matriz. A matriz ferrítica é denominada fase dúctil (de menor resistência mecânica) e as ilhas de martensita são consideradas como a fase dura (de maior resistência mecânica).⁽¹⁾ Como esses aços têm por característica principal possuírem maior resistência mecânica aliada ainda a uma boa ductilidade, sua aplicação tem aumentado muito na indústria automobilística em função das exigências de se ter um menor consumo de combustível, sem prejudicar os conceitos de segurança. Além disso, pelo fato de ser um aço baixo carbono, os aços bifásicos apresentam boa soldabilidade e ainda boa conformabilidade. Essas duas propriedades também são essenciais, pois, sem elas não adiantaria obter um aço mais resistente que não poderia ser processado pelos métodos convencionais (soldado e estampado).

As principais propriedades mecânicas dos aços DP são caracterizadas por:⁽²⁾

- a. comportamento de escoamento contínuo com limite de escoamento entre 310 MPa e 380 Mpa;
- b. alta taxa de encruamento com limite de resistência acima de 550 Mpa; e
- c. alongamento uniforme superior aos encontrados em aços convencionais.

O desempenho de engenharia dos aços conhecidos como aços avançados de alta resistência (Advanced high strength steel - AHSS), caso do aço bifásico do presente estudo, é superior ao dos aços convencionais, dos aços livres de intersticiais (Interstitial free – IF) ou até mesmo quando comparados com os aços alta resistência, baixa liga (High strength, low alloy – HSLA), principalmente quando se trata de aços para fabricação de automóveis considerando aspectos de segurança e também de redução de consumo de combustível do automóvel em virtude da possibilidade de utilização de chapas estruturais de menores espessuras e conseqüente redução no peso dos mesmos.⁽³⁾

Em vista do que foi exposto, viu-se necessário ampliar os estudos sobre os aços bifásicos e conhecer sua microestrutura, determinando como cada variável influencia nas propriedades finais, e principalmente correlacionar condições de tratamento térmico para esse aço com as propriedades mecânicas obtidas, obtendo-se parâmetros que aperfeiçoem o seu processamento, atingindo-se propriedades iguais ou melhores que a do aço original. É nesse âmbito que esta pesquisa vem analisar a influência da temperatura de recozimento intercrítico, processo básico para obtenção da estrutura bifásica ferrita–martensita no aço baixo carbono, com propriedades mecânicas desejadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foi adquirido, para essa pesquisa, uma chapa de aço bifásico comercial nas dimensões de 600 mm de comprimento x 300 mm de largura x 2 mm de espessura, laminada à quente. Como se pode observar na Tabela 1, esse material é um aço com baixo teor de carbono e com teores de manganês e silício elevados.

Tabela 1. Composição química (% em massa) do aço em estudo.

C	Mn	Si	Al	Nb	Cr	P	S	Fe
0,075	1,15	1,08	0,054	0,014	0,092	0,02	0,007	balanço

A partir da chapa laminada foram fabricadas 20 amostras para ensaio de tração segundo a norma ASTM E8M-04⁽⁴⁾ e 52 amostras para ensaio de impacto em espessura reduzida, segundo a norma ASTM E23-02.⁽⁵⁾ As amostras foram retiradas paralelamente ao sentido de laminação da chapa.

2.2 Tratamento Térmico

As amostras foram aquecidas por 30 minutos, de acordo com as temperaturas da Tabela 2, com posterior resfriamento em água. Utilizou-se um forno tipo tubular sob atmosfera de nitrogênio, para evitar oxidação do material. Para cada temperatura foram tratados 05 corpos-de-prova para ensaio de tração e 13 corpos-de-prova para ensaio de impacto.

Tabela 2. Temperaturas de recozimento intercrítico definidas.

Temperatura de aquecimento (°C)	Fração volumétrica de austenita esperada (%)	Identificação das amostras
715	10	USI-01
755	15	USI-02
780	20	USI-03
800	25	USI-04

2.3 Caracterização Microestrutural

Para as quatro amostras da Tabela 2 foram cortadas chapas nas dimensões de 10 mm x 10 mm x 2,0 mm, que em seguida foram embutidas em resina termofixa de cura a quente. Estas amostras foram lixadas com lixas de granulometria de #220, #320 e #500 e depois polidas com pasta de diamante de granulagem de 6 µm, 3 µm e 1 µm. Os corpos-de-prova, depois de polidos, sofreram ataque químico de Nital 2%, para então serem aplicadas às técnicas de metalografia. As frações volumétricas das fases presentes foram medidas pela técnica de contagem de pontos estipulado na norma ASTM E562-02,⁽⁶⁾ e as medições do tamanho do grão ferrítico foram realizadas com base na norma ASTM E112-96⁽⁷⁾ através da utilização do método do intercepto linear médio. A caracterização microestrutural foi realizada por microscópio ótico Leica, modelo DMLM no Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM-FEI) com auxílio de um analisador de imagens digital Leica Qwin/W, usando 30 campos por amostra.

2.4 Ensaio de Tração

Foram realizados 20 ensaios de tração com os corpos-de-prova tratados termicamente em quatro diferentes temperaturas, conforme norma ASTM E 8M-04,⁽⁴⁾ sendo cinco amostras para cada temperatura. Os ensaios de tração foram realizados no CDMatM-FEI utilizando-se a máquina universal de ensaios MTS 810.25. Determinaram-se então, através do ensaio de tração, o limite de escoamento, o limite de resistência e alongamentos total e uniforme. Os dados ainda foram analisados conforme norma ASTM E-646-00⁽⁸⁾ onde, a partir da curva tensão-deformação de engenharia se determinou através da equação de Hollomon,

conforme equação (1), o valor do coeficiente de resistência “K” e o valor do expoente de encruamento “n”.⁽⁹⁾

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

2.5 Ensaio de Impacto

Foram realizados 13 ensaios por série de amostras, conforme norma ASTM E-23-02.⁽⁵⁾ As dimensões das amostras seguiram o anexo A3.1 da referida norma, que considera espessuras reduzidas; porém foi utilizado espessura de 2,0 mm (espessura máxima que foi adquirida comercialmente) alterando-se a condição da norma.

Foram realizados os ensaios em 7 temperaturas entre -196°C a 70°C. Os ensaios foram conduzidos no CDMatM-FEI utilizando-se a máquina de ensaio Charpy. Para se fazer o resfriamento das amostras foi utilizado nitrogênio líquido ou mistura de gelo seco e álcool etílico absoluto.

Para a análise dos resultados obtidos nesse ensaio foi utilizado o ajuste das curvas através da tangente hiperbólica, de acordo com o procedimento ASME PVP2008-61650.⁽¹⁰⁾

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Análise Microestrutural

A Figura 1 mostra as microestruturas dos aços bifásicos tratados termicamente em quatro diferentes temperaturas. O objetivo de se ter diferentes temperaturas de recozimento intercrítico era de se obter diferentes frações em volume de martensita, o que foi atingido, como mostra a Tabela 3.

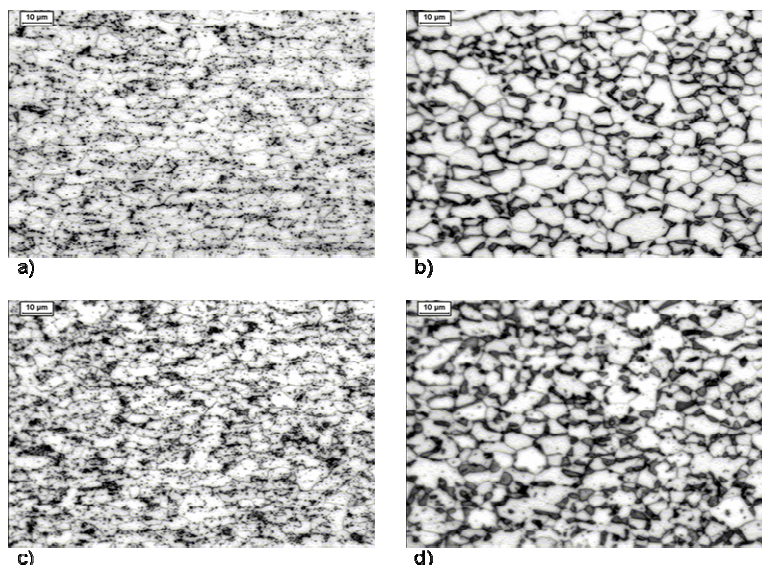


Figura 1. Microscopia óptica das amostras após ataque metalográfico com reativo de Nital 2%: (a) amostra USI-01; (b) amostra USI-02; (c) amostra USI-03; (d) amostra USI-04; onde ferrita é a cor clara e a martensita a escura.

Tabela 3. Fração em volume de martensita e tamanho de grão das amostras em estudo

Identificação das amostras	Fração em volume de martensita	Tamanho de grão		
		Diâmetro médio espacial (μm)	Diâmetro médio planar (μm)	Intercepto médio (μm)
USI-01	8,6 \pm 1,1	7 \pm 0,6	5 \pm 0,3	4 \pm 0,3
USI-02	18,0 \pm 0,7	8 \pm 1,0	5 \pm 0,7	5 \pm 0,6
USI-03	19,7 \pm 1,6	9 \pm 0,5	7 \pm 0,3	6 \pm 0,3
USI-04	25,8 \pm 1,1	9 \pm 1,1	7 \pm 0,8	6 \pm 0,7

3.2 Ensaio de Tração

A Figura 2 apresenta as curvas tensão-deformação de engenharia e a Figura 3 apresenta as curvas tensão-deformação verdadeira. A partir das curvas das Figuras 2 e 3 foram determinadas as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 4.

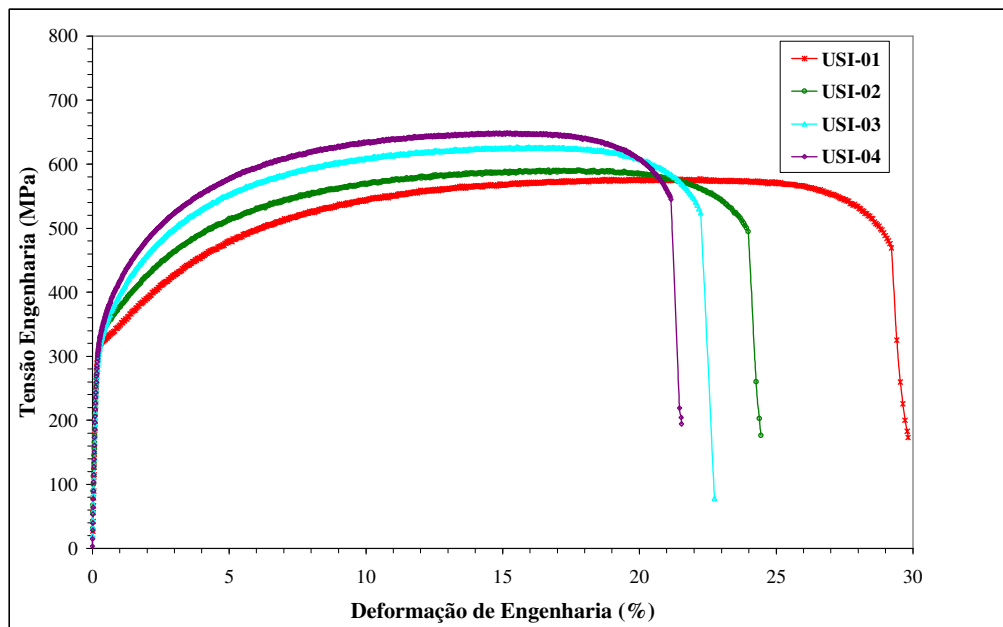


Figura 2. Curvas tensão-deformação de engenharia obtidas através do ensaio de tração.

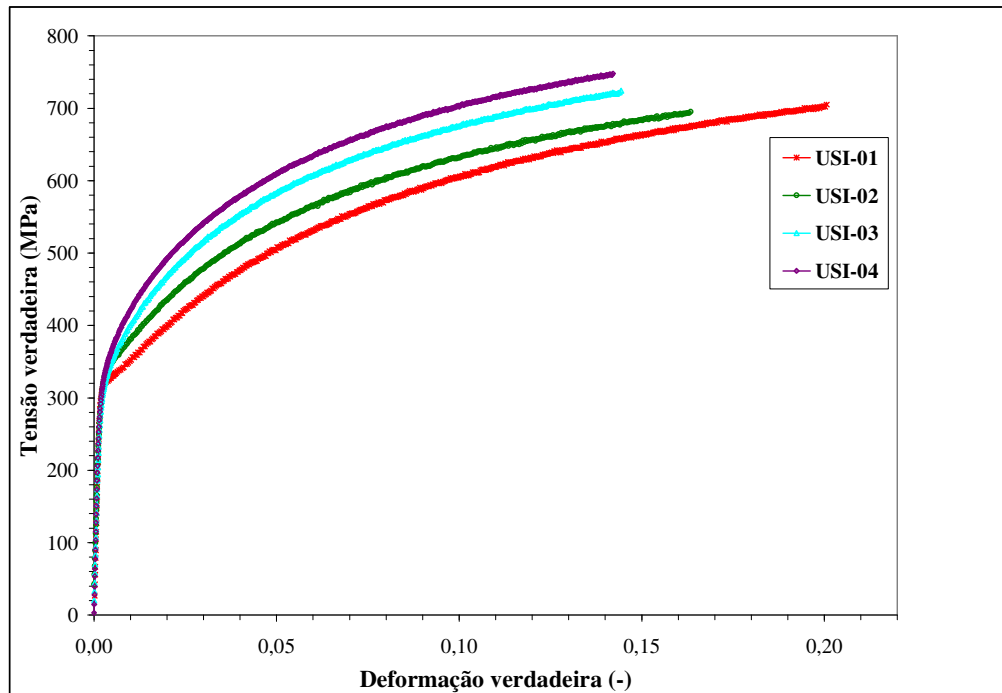


Figura 3. Curvas tensão-deformação verdadeiras obtidas através do ensaio de tração.

Tabela 4: propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração

Identificação das amostras	Limite de escoamento	Limite de resistência	Alongamento	Expoente de encruamento	Coefficiente de resistência
	LE (MPa)	LR (MPa)	At-50mm (%)	n (-)	K (MPa)
USI-01	318±6	580±3	28,9±1,6	0,26±0,01	1094±4
USI-02	336±8	593±8	24,2±0,2	0,24±0,01	1136±5
USI-03	340±15	623±27	23,6±0,9	0,22±0,01	1356±5
USI-04	346±4	650±15	21,2±1,4	0,22±0,01	1453±4

3.3 Ensaio de impacto Charpy

A Figura 4 apresenta a energia absorvida em função das temperaturas de ensaio, ajustadas pela equação da tangente hiperbólica. Os resultados do ensaio de impacto Charpy, para as amostras do aço bifásico em investigação, estão mostrados na Tabela 5.

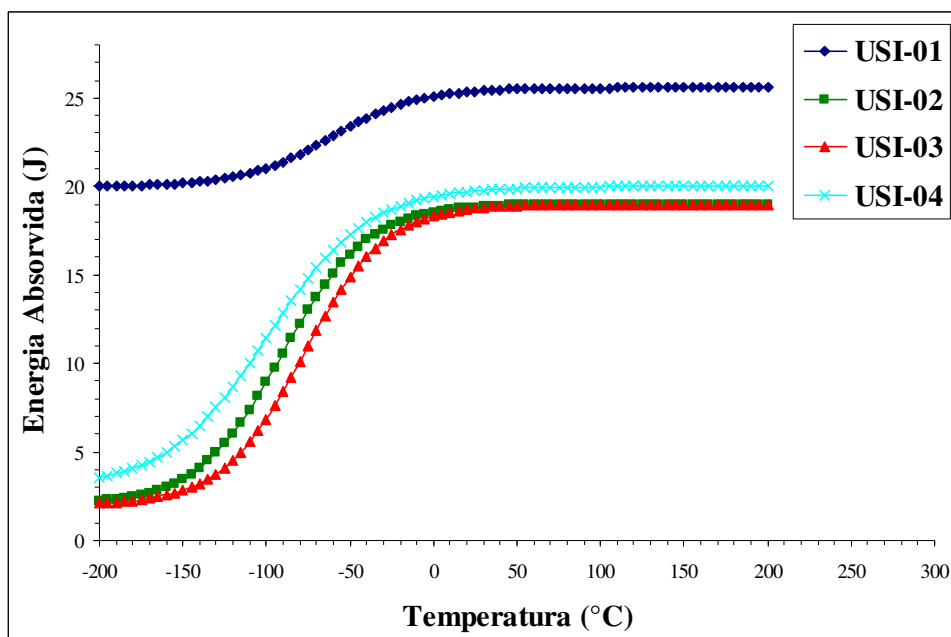


Figura 4. Energia absorvida em função das temperaturas de teste obtida através do ensaio de impacto, ajustadas através da equação hiperbólica.

Tabela 5: Resultados do ensaio de impacto para as amostras do aço bifásico

Identificação das Amostras	Energia (J)			TTDF (°C)
	Patamar superior	Patamar inferior	Valor médio	
USI-01	26,0	20,0	23,0	-66
USI-02	19,0	2,0	10,5	-90
USI-03	19,0	2,0	10,5	-77
USI-04	20,0	3,0	11,5	-99

4 DISCUSSÃO

Como o objetivo desse trabalho é avaliar a influência da temperatura de recozimento intercrítico no comportamento mecânico de um aço bifásico com baixo carbono, é fundamental correlacionar a microestrutura com as propriedades obtidas. Deste modo, na discussão são avaliadas as propriedades mecânicas (comportamento mecânico) em relação à fração de martensita que é função da temperatura de recozimento intercrítico (microestrutura), visto que o tamanho de grão não apresentou uma variação considerável, sendo praticamente o mesmo para todas as amostras, como mostra a Tabela 3.

A Figura 6 apresenta a variação do limite de resistência com a fração em volume de martensita, onde se observa a não linearidade deste comportamento, o que também é observado em muitas pesquisas.⁽¹¹⁻¹³⁾ Essa característica não linear é devido ao fato que a resistência é dependente principalmente de dois fatores: a fração em volume de martensita e o teor de carbono presente na martensita.

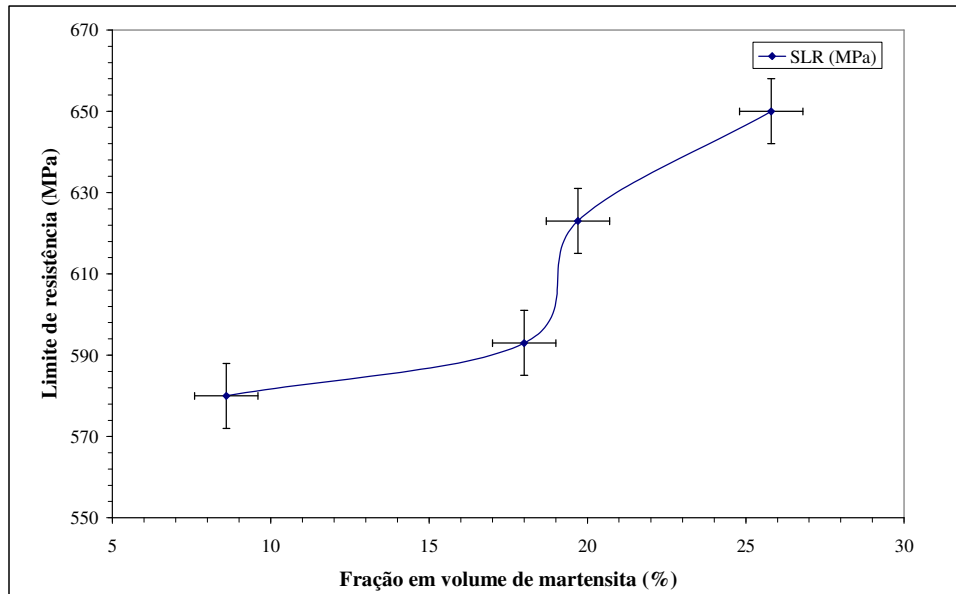


Figura 6. Variação do limite de resistência com a fração em volume de martensita.

Portanto, podem-se notar, na figura 6, duas inclinações, uma inclinação na faixa de 8% a 18% de martensita, sendo um aumento suave da resistência nessa faixa, e a partir de 20% de fração em volume de martensita um aumento mais acentuado do limite de resistência.

O teor de carbono presente na martensita do aço bifásico é determinado pela temperatura de recozimento intercrítico, pois a solubilidade do carbono na ferrita é muito baixa e ela vai diminuindo com o aumento da temperatura de recozimento intercrítico, portanto praticamente todo carbono está presente na austenita que, após o rápido resfriamento em água, está então presente na martensita. Aumentando a temperatura de recozimento intercrítico é formada mais martensita no aço bifásico, porém menor é o teor de carbono na martensita, e a resistência da martensita é muito sensível ao seu teor de carbono, sendo maior sua resistência quanto maior o seu teor de carbono.^(14,15) A Figura 7 apresenta a variação do limite de resistência em função do teor de carbono na martensita (calculado através do software Thermo-Calc®).

Conclui-se então que na faixa de 18% a 26% de fração em volume de martensita há um aumento significativo do limite de resistência apesar da diminuição do teor de carbono na martensita, o que implica que, para o material estudado na faixa mencionada, a variação da fração em volume de martensita é o fator determinante que confere resistência mecânica ao aço bifásico.

Já para a faixa que varia de 8% a 18% de fração de martensita, apesar do aumento na fração em volume, praticamente não há variação do limite de resistência, pois este foi afetado negativamente com a diminuição do teor de carbono na martensita.

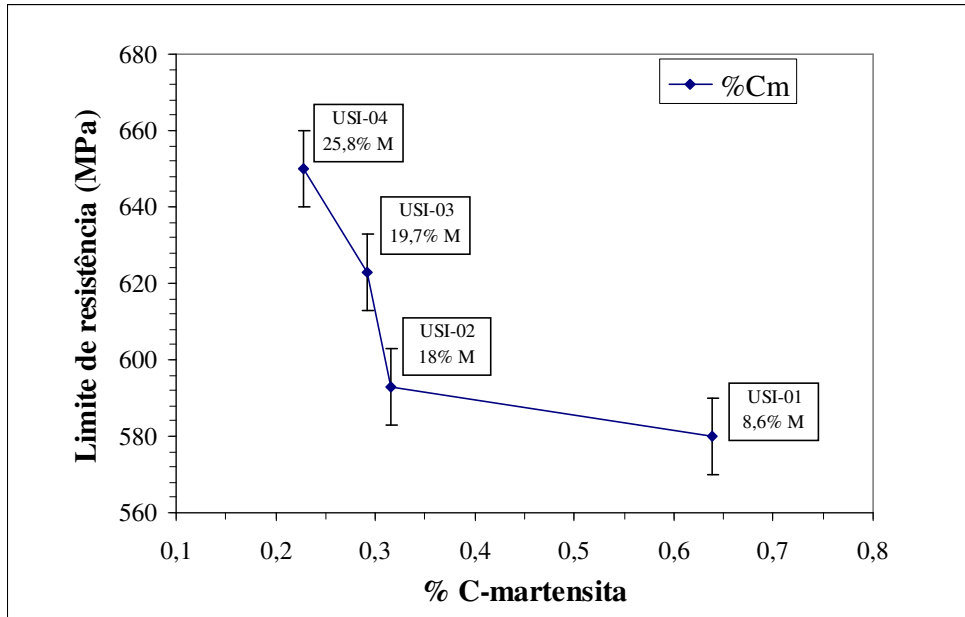


Figura 7. Variação do limite de resistência com o teor de carbono na martensita.

A Figura 8 apresenta a variação do limite de escoamento em função da fração em volume de martensita. Observa-se que, diferentemente do limite de resistência, a curva do limite de escoamento apresenta uma característica linear durante toda a faixa pesquisada, o que indica que o limite de escoamento é função basicamente da fração em volume de martensita.

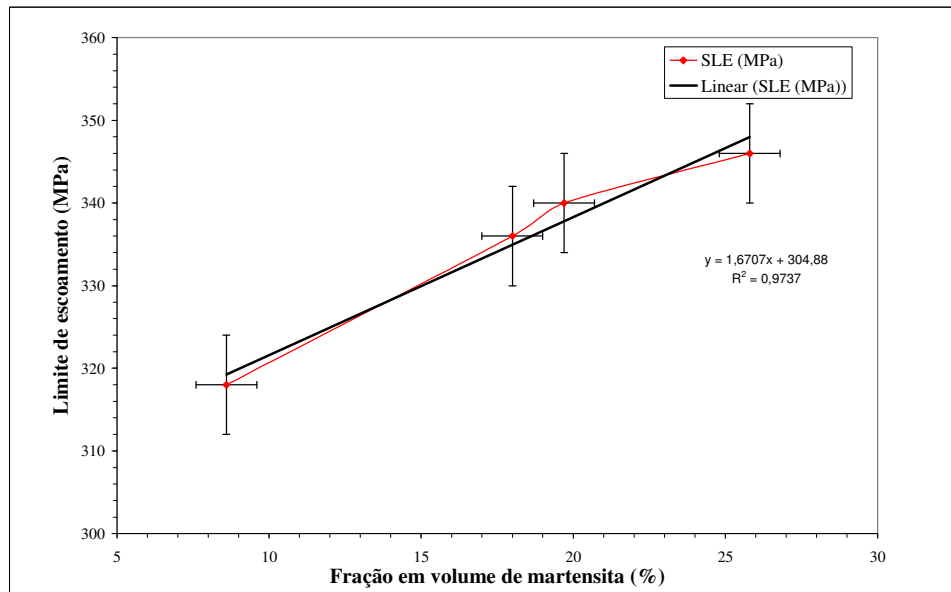


Figura 8. Variação do limite de escoamento com a fração em volume de martensita.

A Figura 9 apresenta a variação do alongamento total e alongamento uniforme com a fração em volume de martensita.

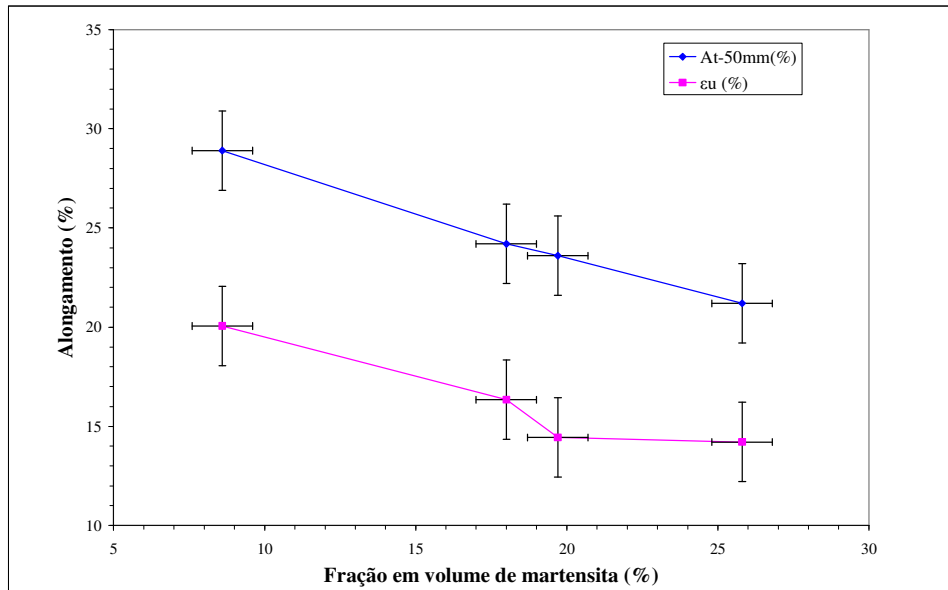


Figura 9. Variação do alongamento total e uniforme com a fração em volume de martensita.

Ambos os parâmetros diminuem com o aumento da fração de martensita, porém com aspectos distintos. Enquanto que na faixa de variação entre 18 e 26% de fração em volume de martensita o alongamento uniforme praticamente não variou, o alongamento total variou linearmente por toda a faixa de fração em volume de martensita estudada.

A relação tensão-deformação para o aço bifásico pode-se dividir em três estágios:

- Estágio 1: As duas fases deformam elasticamente.
- Estágio 2: A fase dúctil (ferrita) deforma plasticamente e a fase dura (martensita) continua se deformando elasticamente.
- Estágio 3: As duas fases deformam plasticamente.

Considerando o alongamento total, o estágio 3 é alcançado, ambas as fases se deformam plasticamente e quanto mais fração em volume de martensita menor será o alongamento total, pois mais difícil torna-se o ajuste plástico entre matriz ferrita e ilhas de martensita. Já para o alongamento uniforme, conforme a fase dúctil se deforma ocorre um aumento de descontinuidade plástica entre a deformação das duas fases (ferrita e martensita) que gera tensões internas, tensões essas que fazem com que a fase dura inicie sua deformação com uma tensão menor que a sua tensão de escoamento. Portanto o aumento de 18 a 26% de fração em volume de martensita não é prejudicial ao alongamento uniforme que está relacionado ao processo de estampagem desse aço, pois as tensões internas geradas pela descontinuidade plástica entre as duas fases promoveram o início da deformação plástica da fase dura com uma tensão mais baixa. Já o alongamento total é afetado negativamente, parâmetro esse que influenciaria a tenacidade do material.⁽¹¹⁾

Do ensaio de impacto, observa-se que o material com menor fração em volume de martensita (8,6%) apresenta o maior valor de energia absorvida de patamar superior, enquanto os demais materiais tratados termicamente não apresentam alteração mesmo aumentando a fração em volume de martensita na faixa que varia de 18% a 26%. Em relação à TTDF, não é possível verificar nenhuma tendência em relação à fração em volume de martensita, sendo que o maior valor encontrado foi de -66 °C, estando de acordo com pesquisas já realizadas.^(3,16)

Com o objetivo de se avaliar qual dos quatro materiais seria o mais recomendado para a aplicação a qual o aço bifásico é destinado, foram selecionadas três propriedades fundamentais, conforme se segue:

1. Limite de escoamento: propriedade mecânica que deve ser maximizada no intuito de reduzir peso na fabricação dos automóveis.
2. Limite de resistência x Alongamento total: relação fundamental que é esperada nos aços bifásicos, em especial para a utilização na indústria automobilística.
3. Alongamento uniforme: parâmetro importante relacionado à estampagem do aço bifásico.

A partir das três propriedades relacionadas, utilizaram-se comparações quantitativas através de índices de desempenho. Como é desejado para as três propriedades relacionadas o máximo valor, foi utilizado o índice de desempenho de acordo com a equação 2.

$$\delta = \frac{P}{MaxP} \quad (2)$$

Onde:

δ : é o índice de desempenho a ser comparado;

P : é o valor numérico da propriedade a ser comparada;

$MaxP$: é o máximo valor da propriedade a ser comparada na mesma categoria.

A partir da média dos índices de desempenho para as três propriedades relacionadas, tem-se o resultado apresentado na tabela 6, onde se conclui que o material denominado USI-01 (tratado intercriticamente a 715°C) apresentou o melhor conjunto de propriedades.

Tabela 6: Índice de desempenho para as propriedades analisadas

Item	Propriedade / Amostra	USI-01	USI-02	USI-03	USI-04
1	Limite de escoamento (MPa)	318	336	340	346
	δA	0,92	0,97	0,98	1,00
2	LR x At-50mm (J/mm ³)	16,7	14,3	14,7	13,8
	δB	1,00	0,86	0,88	0,83
3	Alongamento uniforme (%)	20,1	16,2	14,4	14,2
	δC	1,00	0,81	0,72	0,71
Resultado Final		0,97	0,88	0,86	0,84
		1°	2°	3°	4°

5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- O limite de resistência não varia linearmente com a fração em volume de martensita apresentando duas inclinações, indicando que tanto a fração em martensita quanto o teor de carbono na martensita afetam esse parâmetro.
- O limite de escoamento é afetado apenas pela fração em martensita e, portanto apresenta variação linear.
- A TTDF aponta valores abaixo de -66°C para todas as amostras e não mostrou dependência com a microestrutura. Já a tenacidade, representada pela energia absorvida de patamar superior, do aço tratado termicamente a 715°C foi a de maior valor comparativamente aos outros aços tratados termicamente, e estes por sua vez apresentaram valores bem próximos de energia de patamar superior.

- A partir do índice de desempenho, considerando três parâmetros essenciais desejados nos aços bifásicos, verifica-se que o aço tratado termicamente na temperatura de 715°C apresenta o melhor índice, sendo, portanto, recomendado para a aplicação a qual se destina, em especial, na indústria automobilística.

REFERÊNCIAS

- 1 Akbarpour M. R. e Ekrami A., "Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels", *Material Science & Engineering, A* (2007), doi: 10.1016/j.msea. 2007.05.051.
- 2 Hansen S. S. e Pradhan R. R., "Structure / Properties relationships and continuous yielding behavior in dual-phase steels", *Fundamentals of Dual-phase steels, USA*, 113-114, Feb. 1981.
- 3 Chao Y. J. Ward J.D. e Sands R.G., "Charpy impact energy, fracture toughness and ductile-brittle transition temperature of dual-phase 590 steel", *Materials and Design*, 28 (2007), 551-557, 2005.
- 4 ASTM, E8M-04. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, USA, 2004.
- 5 ASTM, E23-02. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, USA, 2002.
- 6 ASTM, E562-02. Standard Recommended Practice for Determining Volume Fraction by systematic manual point count, USA, 2002.
- 7 ASTM, E112-96. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, USA, 1996.
- 8 ASTM, E646-00. Standard Test Methods for Tensile-Strain Hardening Exponent (n-Values) of Metallic Sheets Materials, USA, 2000.
- 9 Kumar A. Singh S. B. e Ray, K. K., "Influence of bainite/martensite-content on tensile properties of low carbon dual-phase steel", *Material Science & Engineering, A* (2007), doi: 10.1016/j.msea. 2007.05.007.
- 10 Eircksonkirk M. e Shaikh A., "Insights and observations arising from curve-fitting the Charpy V-Notch and tensile data contained within the United States' light water reactor surveillance database", *Proceedings of PVP2008-61650 ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Division Conference, Chicago-Illinois, USA*, 2008.
- 11 Hüper, T., "Effect of volume fraction of constituent phases on the stress-strain relationship of dual phase steels", *ISIJ International*, v.39, No. 3, 288-294, 1999.
- 12 Speich G. R. e MILLER R. L., "Formation of Austenite during Intercritical Annealing". *Metallurgical Transactions*. 1980.
- 13 Speich G. R., "Physical Metallurgy of Dual-phase steel", *Fundamentals of Dual-phase steels, USA*, 3-45, 1981.
- 14 Messien P. Herman J.C. e Gréday T., "Phase transformation and microstructures of intercritical annealed dual-phase sheets", *Fundamentals of Dual-phase steels, USA*, s. 1, 161-180, 1981.
- 15 Sawar M. e Priestner R., "Influence of ferrite – martensite microstructural morphology on tensile properties of dual-phase steel". *Journal of Materials and Science*, v. 31; 2091-2095, 1996.
- 16 Magnabosco R. e Rosseto L. C., "Toughness of two HSLA steel sheets". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 25 no.2 Rio de Janeiro, 2003.