

# ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO SAE 4140 COM ESTRUTURA BIFÁSICA

**Marcos Antônio de Carvalho Rocha**

**Sérgio Souto Maior Tavares**

**Maria da Penha Cindra Fonseca**

**Juan Manuel Pardal**

**Viviane Florido Terra**

UFF – Universidade Federal Fluminense, PGMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rua Passo da Pátria, 156, Sala 302, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói-RJ, Brasil, [ssmtavares@terra.com.br](mailto:ssmtavares@terra.com.br)

**Resumo.** Os aços bifásicos são uma nova classe de aços baixa liga que têm excelente balanço de resistência e ductilidade. O desenvolvimento destes materiais se concentrou nos aços com baixo teor de C (<0,20%). Em aços com teor de C mais elevado (>0,30%), o endurecimento é obtido tradicionalmente com tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Neste trabalho foram feitos diferentes tratamentos térmicos em um aço SAE 4140, visando obter estruturas bifásicas de ferrita e martensita. A comparação das propriedades mecânicas obtidas com aquelas do material tratado pelo modo convencional (têmpera completa e revenido) permitiu avaliar a eficácia dos novos tratamentos propostos. Os ensaios de dureza Rockwell e impacto Charpy foram realizados em todas as condições de tratamento térmico. Em algumas condições foram realizados ensaios de tração. Microscopias ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) foi usada para a caracterização microestrutural das amostras.

**Palavras-chave:** aços bifásicos, caracterização microestrutural, tratamentos térmicos.

## 1. INTRODUÇÃO

Os aços bifásicos ferrítico-martensíticos foram desenvolvidos inicialmente para a indústria automobilística por terem alta resistência e boa conformabilidade. Considerados de alta resistência e baixa liga (ARBL), estes aços apresentam microestrutura constituída de duras “ilhas” de martensita dispersas em uma matriz ferrítica dúctil e macia; contudo, pequenas quantidades de outras fases ou microconstituintes (como bainita, austenita retida e perlita) podem estar presentes<sup>1</sup>.

Este trabalho, por outro lado, se dedica a estudar as características mecânicas e microestruturais de um aço médio carbono SAE 4140 tratado para uma microestrutura bifásica de ferrita e martensita. Essa estrutura bifásica foi produzida por duas rotas: i) têmpera seguida de tratamento intercrítico e ii) tratamento intercrítico. Tratamentos de revenido foram realizados a partir de estrutura bifásica. Os resultados foram comparados com o material temperado e revenido.

O aço SAE 4140 apresenta temperaturas  $A_1$  e  $A_3$  iguais a 750°C e 790°C, respectivamente. Após alguns testes preliminares, decidiu-se que a temperatura ideal para os tratamentos intercríticos para a produção da estrutura bifásica deveriam ser realizados a  $(766 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

Os aços bifásicos podem ser obtidos através de um tratamento térmico efetuado na zona intercrítica, isto é, entre a temperatura eutetóide  $A_1$  e a temperatura de austenização completa  $A_3$  do material, onde ele apresenta as fases ferrita e austenita. Este tratamento térmico consiste de um

recozimento na zona intercrítica seguido de um resfriamento rápido com o intuito de transformar a austenita em martensita, produzindo uma microestrutura final constituída de ferrita e martensita.

De acordo com YANG et al.<sup>2</sup>, um recozimento intercrítico a baixas temperaturas, logo acima da linha A<sub>1</sub>, produz uma distribuição de partículas finas de austenita e, conseqüentemente, uma fina dispersão de partículas de martensita após a têmpera. Já a altas temperaturas, forma-se austenita com fração volumétrica maior que a fração volumétrica das colônias perlíticas da microestrutura original do material.

O tempo de permanência do aço em recozimento intercrítico e a temperatura intercrítica influencia a temperabilidade da austenita. Quanto maior for esse tempo, maior é a temperabilidade da austenita, devido à maior homogeneização e maior crescimento dos cristais de austenita<sup>3</sup>. Quanto maior a temperatura intercrítica, menor será a temperabilidade da austenita, devido à redução do teor de C da zona intercrítica. As propriedades mecânicas também variam com a temperatura de tratamento intercrítico de forma complexa. Temperaturas elevadas produzem altas quantidades de austenita à temperatura de tratamento, que potencialmente pode se transformar em martensita no resfriamento. A total conversão desta austenita depende muito da velocidade de resfriamento e composição química do aço, pois é uma austenita de temperabilidade mais baixa. Caso se converta totalmente em martensita, esta possuirá dureza menor, pois tem menos C, mas estará presente em grandes quantidades. A austenita obtida a menores temperaturas de tratamento intercrítico está presente em menor quantidade, é mais temperável e produz uma martensita mais resistente.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Nesse trabalho foi utilizado um aço SAE 4140 da Companhia Siderúrgica Gerdau, fabricado na forma de barra redonda com diâmetro de 12,7 mm, cuja composição química está mostrada na Tabela 1. O material como recebido apresentou uma microestrutura ferrítica-perlítica.

Tabela 1 – Composição química do aço 4140 (% em peso).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,40	0,87	0,025	0,040	0,22	0,95	0,20

Foram usinados corpos-de-prova Charpy para ensaio de impacto segundo a norma ASTM EB-23-94b e de tração, segundo a norma ASTM A 370 – 88.

A resistência mecânica e a tenacidade ao impacto do aço SAE 4140 foram analisadas no material submetido a três tratamentos térmicos distintos:

- têmpera em óleo a partir de 900°C (após 2h a essa temperatura), para obter 100% de martensita;
- têmpera em óleo a partir de 766°C (região intercrítica), após 2h a essa temperatura, para transformar a austenita em martensita e obter estrutura bifásica (ferrita e martensita);
- e têmpera a partir de 900°C (após 2h a essa temperatura), para obter 100% de martensita, seguida de recozimento a 766°C (região intercrítica) por 1h e, a seguir, têmpera em óleo, para transformar a austenita em martensita e obter estrutura bifásica (ferrita e martensita de grãos refinados).

Após a têmpera, o recozimento intercrítico e o recozimento intercrítico precedido por têmpera, os corpos-de-prova de impacto e de tração foram revenidos a diversas temperaturas por 1h. Alguns corpos-de-prova não foram revenidos para obtenção das propriedades das estruturas bifásicas sem revenido. A Tabela 2 mostra os tratamentos térmicos realizados neste trabalho.

Tabela 2 – Temperaturas e tempos de revenidos utilizados.

Tratamento térmico para obter estrutura bifásica ou martensítica	Revenido [°C]					
	- (*)	200	300	400	500	600
Têmpera (900°C/2h)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Têmpera (900°C/2h) + Intercrítico (766°C/1h)	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Intercrítico (766°C/2h)	M13	M14	M15	M16	M17	M18

(\*) Amostra não revenida.

A temperatura foi monitorada com termopar e sua variação máxima foi de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ . Após o revenido, os corpos-de-prova foram resfriados até a temperatura ambiente por ventilação forçada.

Os tratamentos térmicos de têmpera, recozimento intercrítico e revenido a  $500^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$  foram realizados com corpos-de-prova protegidos em cadinho contendo carvão e cavaco de ferro fundido para evitar a descarbonetação.

As amostras para metalografia, preparadas pelo procedimento usual, foram atacadas com nital 2% e reagente Le Pêra (picral 4% com uma solução de 1% de metabissulfito de sódio em água). O procedimento de ataque incluiu o polimento fino com pasta de diamante, intercalado por ataques rápidos com nital 2%, antes do ataque final com a solução indicada. Este ataque é indicado para aços bifásicos, pois revela a ferrita em cor marrom, a austenita em cor branca e a bainita em cor escura. Para revelar os contornos de grão da austenita prévia foi usado o ataque com uma solução composta de 200ml de água destilada com 4g de cloreto férrico e 4g de ácido pícrico.

As medidas de dureza foram feitas pelo método de dureza *Rockwell* – escala C em todas as condições apresentadas na Tabela 2. As amostras de dureza foram os próprios corpos-de-prova de impacto Charpy já fraturados.

Os ensaios Charpy foram realizados numa máquina do tipo pêndulo universal com capacidade máxima de 300 J e precisão de  $\pm 0,5$  J à temperatura ambiente. Todas as condições listadas na Tabela 2 foram ensaiadas.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina servo-hidráulica, automatizada da marca *Instron*, modelo 8802, com capacidade máxima de carga 25.000 kgf para ensaios estáticos e dinâmicos. Apenas seis condições de tratamento térmico, das listadas na Tabela 2, foram ensaiadas em tração: M1, M7, M13, M5, M11 e M17.

Foram determinadas as deformações máximas, limite de escoamento, limite de resistência e redução de área. Foi levantada uma série de pontos na curva carga *vs* deslocamento, para posteriormente serem plotados os gráficos tensão *versus* deformação normal e verdadeira. Para tratamento dos dados e construção dos gráficos utilizou-se o software *Microcal Origin*.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A microestrutura do aço SAE 4140 no estado como recebido (material recozido), constituída de ferrita e carbonetos grosseiros (Figura 1), tem uma dureza de 91HRB.



Figura 1 – Microestrutura do aço SAE 4140 como recebido. Ataque: nital 2%. Aumento: 900X.

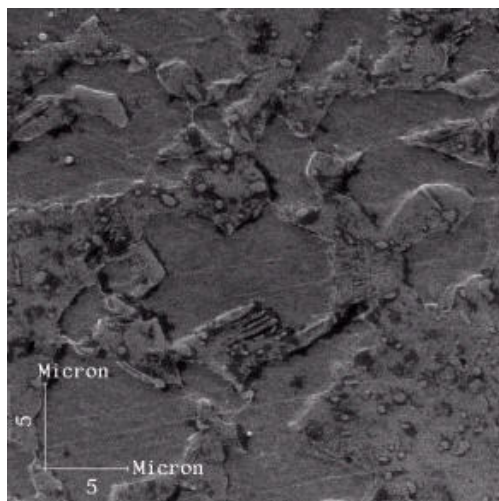
Visando obter os parâmetros ótimos de tratamento, foram realizados ensaios preliminares, que consistiram de tratamentos térmicos, medidas de dureza e metalografia. Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro 12,5 mm e espessura de 10 mm extraídos das barras do aço SAE 4140.

O primeiro teste consistiu em tratar as amostras de duas maneiras: (a) aquecimento a  $770^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos seguido de resfriamento em óleo e (b) têmpera a partir de austenização a  $850^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos, seguido de tratamento a  $770^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos, com resfriamento em óleo. A Tabela 3

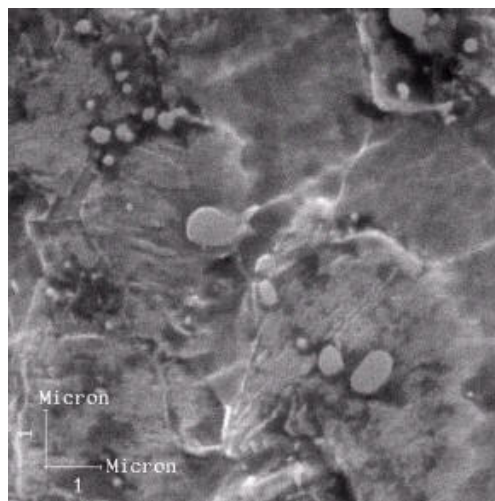
mostra as durezas obtidas. A microestrutura dessas amostras apresentou uma grande quantidade de carbonetos grosseiros na matriz ferrítico-martensítica, conforme mostrado na Figura 2.

Tabela 3 – Medidas de dureza e microestruturas.

Tratamento térmico para obtenção da estrutura bifásica ou martensítica	Dureza (Superfície)	Microestrutura
Intercrítico (770°C/30min.)	455 HV (46 HRC)	Figura 2 (a)
Têmpera (850°C/30 min.) acrescido de Intercrítico (770°C/30min.)	318 HV (32 HRC)	Figura 2 (b)



(a)



(b)

Figura 2 – Microestruturas reveladas com microscopia eletrônica de varredura e ataque de nital 2%. (a) Tratamento de recozimento intercrítico a 766°C/30 min. Aumento: 3000 X. (b) O mesmo tratamento intercrítico, precedido por têmpera a 850°C/30min. Aumento: 10000 X.

Para dissolver mais carbonetos e, assim, aumentar a dureza do aço temperado e tratado no intervalo intercrítico, o tempo e a temperatura de austenização escolhidos foram 2h e 900°C, respectivamente. No aço tratado intercriticamente e se têmpera prévia, o tempo de recozimento escolhido foi 2h, visando também dissolver carbonetos e homogeneizar a microestrutura.

Um segundo teste foi realizado para determinar a temperatura ideal para o tratamento intercrítico. Três amostras do material como recebido foram austenitizadas a 900°C por 2h e temperadas em óleo. Em seguida, cada amostra foi tratada a uma temperatura intercrítica: 762°C, 768°C e 773°C. A Tabela 4 apresenta os valores de dureza obtidos.

Tabela 4 – Valores de dureza obtidos no segundo teste preliminar.

Têmpera	Tratamento Intercrítico	Dureza
900°C/ 2 h	762°C/1h	314 HV(31,5 HRC)
Resfriamento em óleo	768°C/2h	473 HV (47 HRC)
	773°C/1h	904 HV(67 HRC)

As Figuras 3 (a), (b) e (c) apresentam as microestruturas obtidas nas temperaturas intercríticas de 762°C, 768°C e 773°C, respectivamente. O material tratado a 762°C (Figura 3 (a)) apresenta pouca quantidade de ferrita em uma matriz de estrutura típica de martensita revenida. O tratamento a 773°C produziu uma estrutura de martensita não revenida, (Figura 3 (b)), bastante dura. A amostra tratada a 768°C, (Figura 4), apresentou a estrutura bifásica de martensita (67%) e ferrita (33%). A temperatura de tratamento intercrítico ideal deve fornecer uma quantidade um pouco superior de ferrita, sendo, portanto, fixada em 766 – 767°C para os experimentos subsequentes.

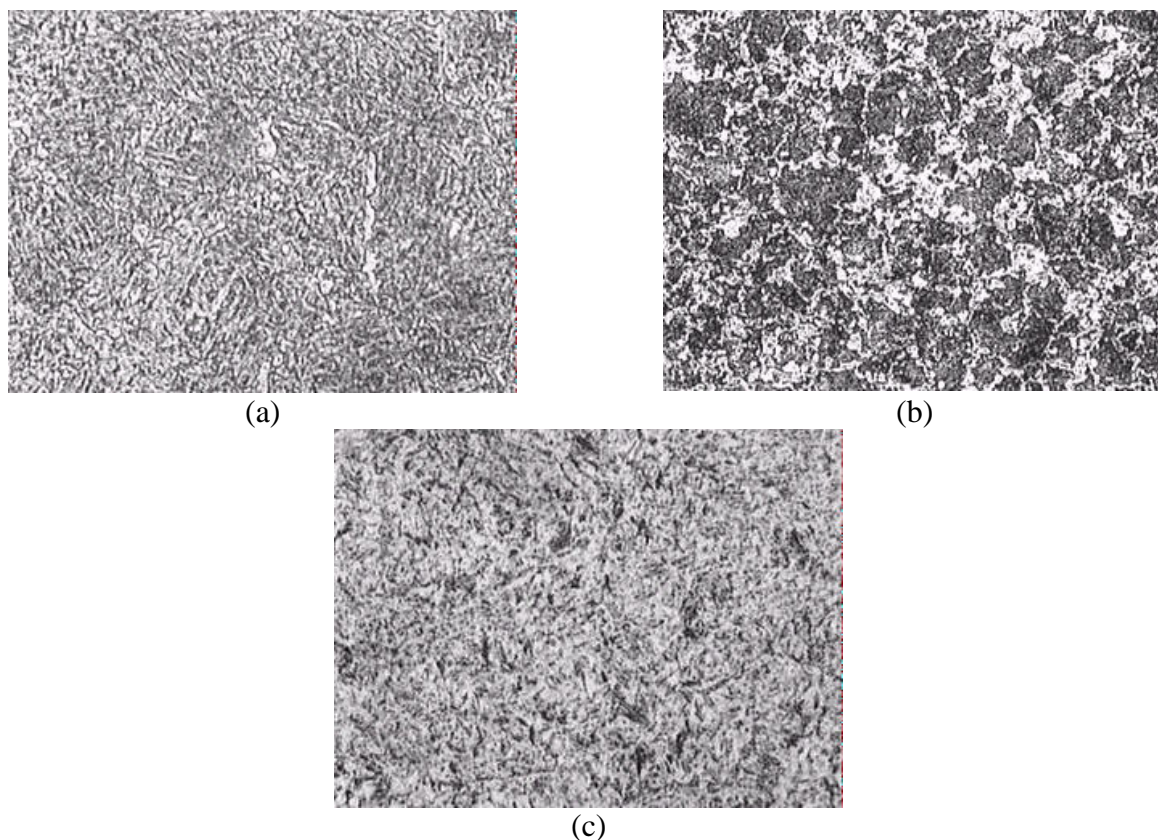


Figura 3 – Microestruturas resultantes dos tratamentos de recozimentos intercríticos precedidos por têmpera a 900°C/2h: (a) 762°C/1h. (700 X); (b) 768°C/1h (700 X); (c) 773°C (700X).

Os tratamentos térmicos foram feitos em 18 amostras. A tabela 5 apresenta essas amostras, assim como as suas durezas e energias de impacto Charpy. A dureza apresentada nessa tabela é a média aritmética dos valores de dureza medidos em corpos-de-prova de impacto fraturados.

Tabela 5 – Dureza e energia de impacto do aço SAE 4140 após os tratamentos térmicos.

Tratamento Térmico		Amostra	Dureza [HRC]	Energia Charpy [J]
Têmpera e/ou Trat. Intercrítico	Temperatura do Revenido [°C]			
Têmpera 900°C / 2h (Resfriamento em óleo)	não revenida	M1	54,70 ± 0,50	23
	200	M2	54,30 ± 0,60	34
	300	M3	48,25 ± 0,35	17
	400	M4	48,20 ± 0,50	18
	500	M5	39,82 ± 0,41	79
	600	M6	31,10 ± 0,70	130
Têmpera 900°C / 2h acrescido de Recozimento Intercrítico 766 – 767°C / 1h (Resfriamento em óleo)	não revenida	M7	47,20 ± 0,80	47
	200	M8	45,00 ± 1,00	27
	300	M9	35,00 ± 0,27	26
	400	M10	43,90 ± 3,50	36
	500	M11	31,35 ± 0,33	86
	600	M12	21,80 ± 0,90	144
Recozimento Intercrítico 766 – 767°C / 2h (Resfriamento em óleo)	não revenida	M13	46,90 ± 0,60	38
	200	M14	48,20 ± 0,40	16
	300	M15	44,25 ± 0,40	21
	400	M16	36,90 ± 1,00	34
	500	M17	32,30 ± 0,40	116
	600	M18	24,10 ± 0,60	150

A Figura 4 apresenta as curvas de dureza *versus* temperatura de revenido para as diversas condições de tratamento térmico realizadas.

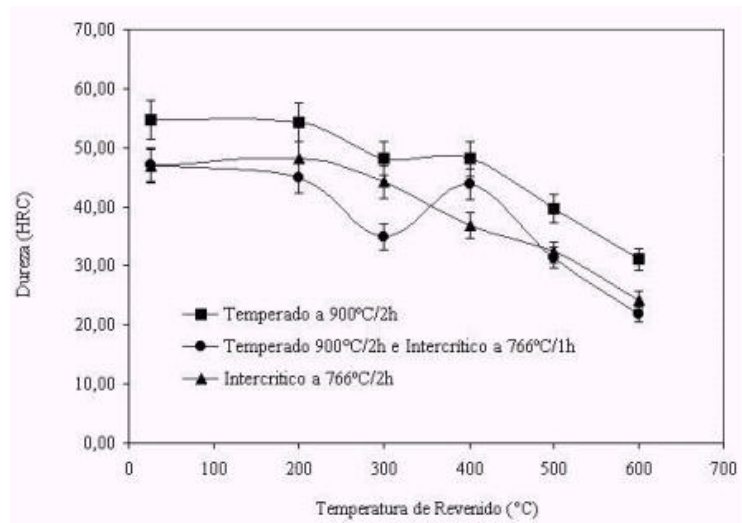


Figura 4 – Dureza *versus* temperatura de revenido para as diversas condições de tratamento.

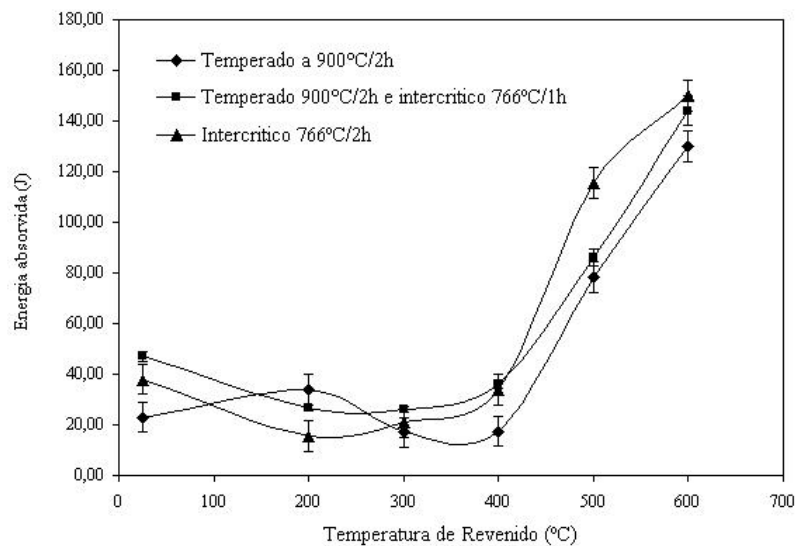


Figura 5 – Energia absorvida em função da temperatura para as diversas condições de tratamento térmico.

Analisando as amostras sem revenimento (M1, M7 e M13) observa-se maior tenacidade na amostra temperada e tratada intercriticamente (M7), seguido da amostra bifásica unicamente tratada no intercrítico (M13). A amostra temperada e revenida a 200°C apresenta uma recuperação da tenacidade ao impacto com o revenido, seguido pelo declínio nas temperaturas 300°C e 400°C. É bem provável que nestas temperaturas haja fragilização de revenido, típica de aços baixa liga desta classe. As amostras com estrutura bifásica também experimentam queda de tenacidade com o revenido até 400°C, mas em menor grau, sobretudo a amostras temperadas e tratadas intercriticamente.

Das 18 condições de tratamento térmico realizadas, 6 foram selecionadas para os ensaios de tração: M1, M5, M7, M11, M13 e M17. Na Tabela 6 acham-se listados os valores do limite de escoamento ( $\sigma_{LE}$ ), limite de resistência ( $\sigma_{LR}$ ) e alongamento total ( $\varepsilon$ ), seguindo-se de gráficos comparativos das curvas tensão *versus* deformação nominal e verdadeira (Figuras 6 - 8).

Tabela 6 – Propriedades mecânicas.

Corpo-de-prova	Tratamento Térmico	$\sigma_{LE}$ [MPa]	$\sigma_{LR}$ [MPa]	$\epsilon$ [%]
CP-1	M1	1362	2112	10
CP-3	M17	902	1074	14
CP-5	M5	1034	1197	14
CP-6	M11	1034	1141	12
CP-8	M7	1194	1939	8
CP-9	M13	998	1578	5

A Figura 6 mostra as curvas de tração nominal e verdadeira das amostras tratadas nas condições M1 (temperado a 900°C/2 h) e M5 (temperado a 900°C/2h e revenido a 500°C/1h). O revenimento a 500°C aumenta muito o alongamento e a queda da resistência mecânica, como já mostrado na Tabela 6, além de diminuir o coeficiente de encruamento, conforme se vê na Figura 6(b).

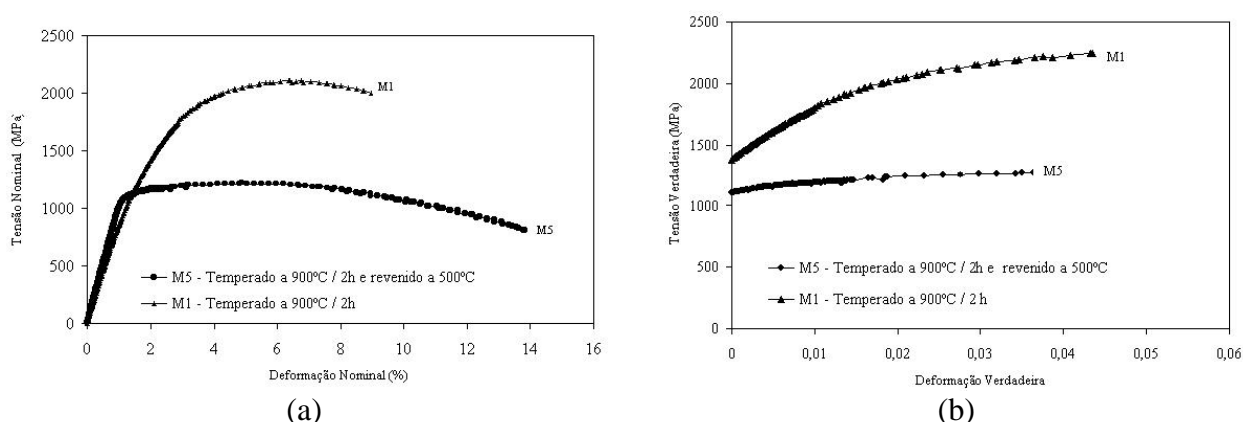


Figura 6 – Amostras temperadas a 900°C / 2h (M1) e temperadas a 900°C / 2h e revenidas a 500°C (M5). a) Tensão nominal vs deformação nominal. b) Tensão verdadeira vs deformação verdadeira.

Nas amostras com estrutura bifásica também pode ser observada a queda da resistência e do expoente de encruamento com o revenido a 500°C, conforme mostram as Figuras 8 e 9.

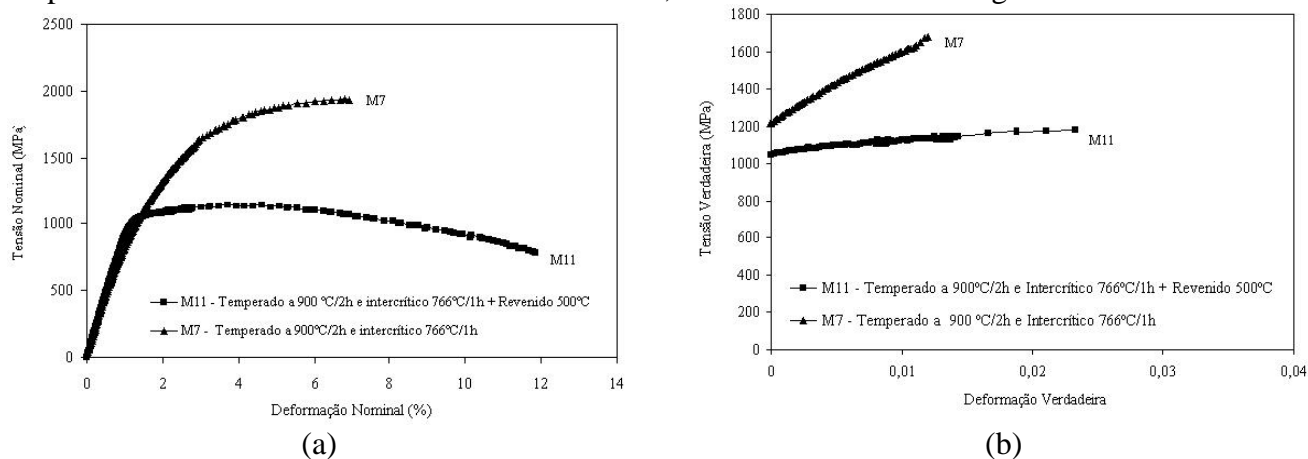
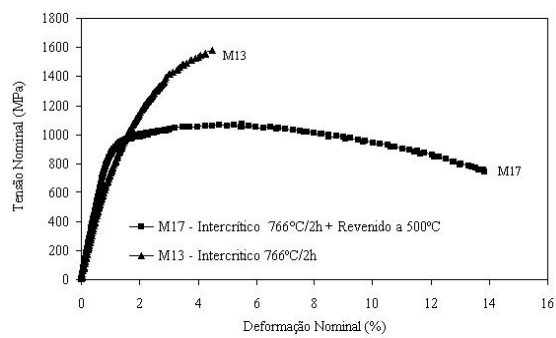
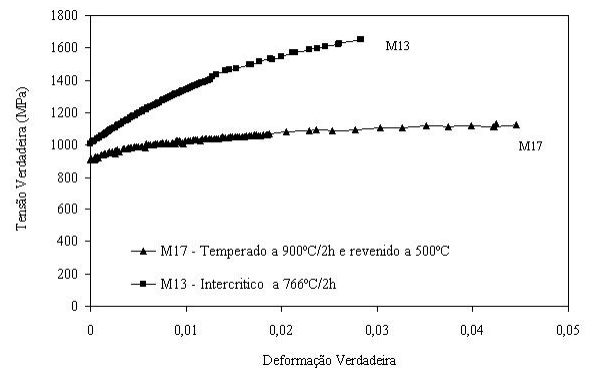


Figura 7 – Amostras temperadas a 900°C/2h seguido de recozimento intercrítico a 766°C / 1h (M7), acrescido de revenido a 500°C (M11) a) Tensão nominal vs deformação nominal. b) Tensão verdadeira vs deformação verdadeira.



(a)



(b)

Figura 8 – Amostras tratadas com recozimento intercrítico a 766°C / 2h (M13), acrescido de revenido a 500°C (M17). a) Tensão nominal vs deformação nominal. b) Tensão verdadeira vs deformação verdadeira.

A Figura 9 apresenta a microestrutura da 100% martensítica da amostra M1, temperada a partir de 900°C. As Figuras 10 (a) e (b) apresentam a microestrutura da amostra M7, temperada e tratada intercriticamente.

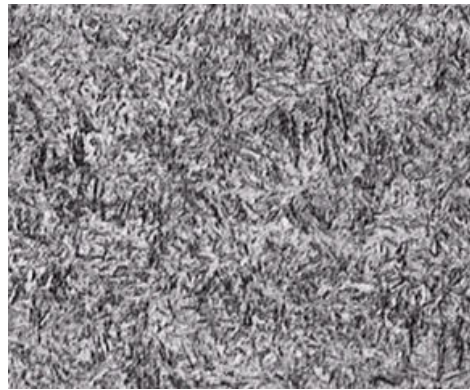
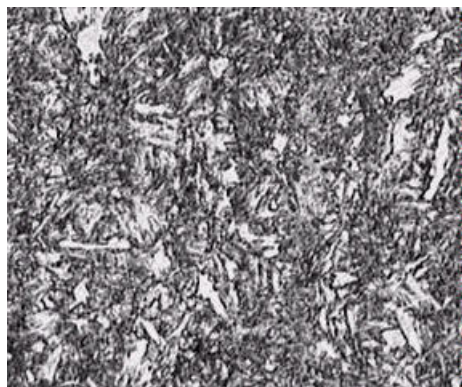


Figura 9 – Amostra M1. Microestrutura resultante do tratamento de têmpera a 900°C/2h e ataque com nital 2%. Aumento de 350 X.



(a)



(b)

Figura 10 – Amostra M7 (a) Aumento: 350X, ataque: nital 2%; (b) 700X, Le Pera.

A Figura 11 mostra a microestrutura da amostra M13, tratada intercriticamente sem têmpera prévia. As amostras M7 e M13 têm estruturas bifásicas de ferrita e martensita, que se diferenciam, porém, na morfologia dos grãos. A amostra M13 tem grãos mais arredondados e equiaxiais.



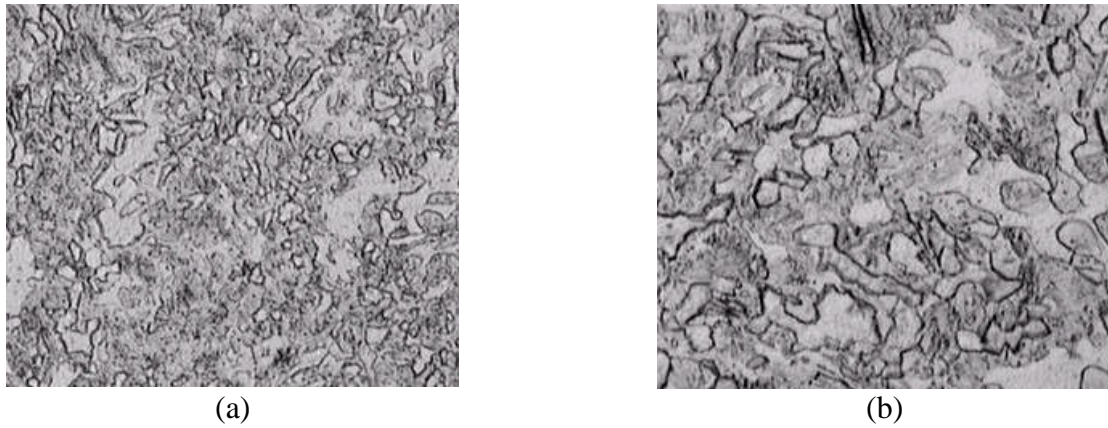


Figura 11 – Amostra M13: (a) 700X; (b) 1400X. Ataque: Le Pera.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram as microestruturas reveladas com o reagente a base de cloreto férrico e ácido pícrico, próprio para revelar os contornos de grão da austenita prévia. É possível perceber claramente que as amostras com estrutura bifásica (M7 (Figura 13) e M13 (Figura 14)) apresentam grãos mais finos em relação à amostra temperada (M7, Figura 12). A amostra M13 possui uma granulometria mais homogênea do que a amostra M7. O diâmetro médio dos grãos das amostras M1 e M7, obtidos por metalografia quantitativa, foram  $12,9\mu\text{m}$  e  $3,9\mu\text{m}$ , respectivamente.

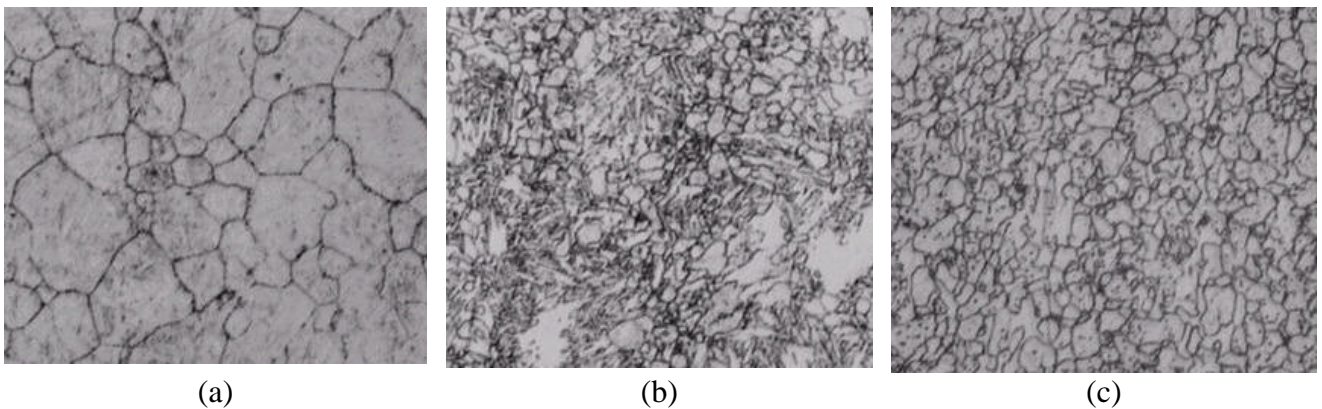


Figura 12 – Microestruturas das amostras com aumento de 700X. a) M1. b) M7. c) M13.

Uma das grandes potencialidades dos tratamentos na obtenção das microestruturas bifásicas é certamente o efeito de refino de grão mostrado nas Figuras 14 e 15. Essa característica microestrutural pode explicar a melhor tenacidade das amostras com estruturas bifásicas.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizados diferentes tratamentos térmicos em um aço SAE 4140, visando obter microestrutura bifásica ferrítica-martensítica e feita a comparação das propriedades mecânicas obtidas após estes tratamentos com aquelas apresentadas pelos tratamentos convencionais (têmpera e revenido). Este estudo permite concluir que:

- As estruturas bifásicas de ferrita e martensita podem ser obtidas em um aço SAE 4140 com tratamentos intercríticos a  $766^{\circ}\text{C}$  seguidos de resfriamento em óleo, precedido ou não por têmpera a partir de  $900^{\circ}\text{C}$ ;

- As estruturas bifásicas produzidas por tratamento intercrítico precedido ou não por têmpera alcançaram valores maiores de tenacidade, o que se deve à granulação mais fina do que a apresentada pelo material temperado.

- Embora produzam alta tenacidade, os tratamentos intercríticos são de difícil execução no aço SAE 4140, pois o intervalo de temperaturas para este tratamento é bastante estreito e exige fornos com controle de alta precisão.

## 5. REFERÊNCIAS

1. SPEICH, G. R., “Dual – Phase Steels”, Metals Handbook, Vol. 1, pp. 424 – 429.
2. YANG D. Z., BROWN, E.L., MATLOCK, D.K., KRAUSS, G., “The Formation of Austenite at low Intercritical Annealing Temperatures in a Normalized 0,08C – 1,45Mn – 0,2Si Steels”, Met. Trans., Vol.16 A, pp. 1523-1526, 1985.
3. SHEN, X. P., PRIESTNER, R., “Effect of Boron on the Microstructure and Tensile Properties of Dual-Phase Steel”, Met. Trans., Vol. 21 A, pp. 2547 – 2553, 1990.

### MECHANICAL PROPERTIES STUDY OF A SAE4140 DUAL PHASE STEEL

**Marcos Antônio de Carvalho Rocha**

**Sérgio Souto Maior Tavares**

**Maria da Penha Cindra Fonseca**

**Juan Manuel Pardal**

**Viviane Florido Terra**

UFF – Universidade Federal Fluminense, PGMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rua Passo da Pátria, 156, Sala302, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói-RJ, Brasil, [ssmtavares@terra.com.br](mailto:ssmtavares@terra.com.br)

**Abstract:** Dual phase (DP) steels are a new class of low alloy steels which present excellent balance of ductility and mechanical resistance. The development of this family of steels has been concentrated in low carbon (<0,20%C) grades. The hardening of higher carbon (>0,30%) is usually done by quenching and tempering. In this work different heat treatments were performed to produce dual phase structures in the SAE 4140 steel. The comparison between the mechanical properties obtained with those of the conventional treatment allowed to evaluate the efficacy of the new treatments proposed. Hardness and impact tests were performed in all conditions. Tension tests were done in some conditions. Optical and electronic microscopy was also used to characterize the samples.

**Keywords:** Dual-phase steels, microstructural characterization, heat treatments.