

# INFLUÊNCIA DO TEOR DE FÓSFORO E DA TEMPERATURA DE TÊMPERA NA TENACIDADE AO IMPACTO DO AÇO MOLA SAE 5160 <sup>1</sup>

Danilo Borges Villarino de Castro<sup>2</sup>

Jaime Milan Ventura<sup>3</sup>

Waldek Wladimir Bose Filho<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo investigar a influência do teor de fósforo, nos limites de 0,012 e 0,025 (% em peso), e da temperatura de austenitização de têmpera sobre a tenacidade ao impacto do aço SAE 5160 utilizado para fabricação de molas planas de caminhões. Foram efetuados tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento em lâminas de aço SAE 5160 com bitolas de 70x10 mm, utilizando três diferentes temperaturas de austenitização: 850°C, 900°C, e 1000°C, sendo o tempo de 15 minutos de permanência na temperatura de austenitização para têmpera e resfriados em óleo de têmpera à 66°C. A seguir as amostras foram revenidas à 500°C por 1 h. Para avaliação da fragilização foram confeccionados corpos de prova do tipo Charpy com entalhe em V e microscopia eletrônica de varredura. Das análises dos resultados foi possível identificar que o aumento da temperatura de austenitização, para ambos os teores de P reduzem a tenacidade ao impacto. Entretanto, no caso do aço com 0,025 (% em peso), mesmo para a mais baixa temperatura de austenitização (850°C) a tenacidade ao impacto foi reduzida significativamente e o modo de fratura foi predominantemente intergranular.

**Palavras-chave:** Fragilização por têmpera; Aço 5160; Austenitização; Fósforo.

## ON THE EFFECTS OF THE PHOSPHORUS CONTENT AND AUSTENITIZING TEMPERATURE ON THE IMPACT TOUGHNESS PROPERTIES OF SAE 5160 SPRING STEEL

### Abstract

The aim of this work was to investigate the influence of the phosphorus content (0,010 and 0,025 (wt %)), and the quenching austenitizing temperature on impact toughness of the steel SAE 5160H used for plain springs manufacturing. The SAE 5160H steel bars were heat treated using three different austenitizing temperatures 850°C, 900°C, and 1000°C, with holding time of 15 min, and tempered for 1h at 500°C. Charpy tests were carried out for embrittlement evaluation. The fracture surface was analysed using scanning electronic microscopy. The results showed that when the P amount was increased from 0,010 to 0,025 the impact toughness drop from 400 to 170 kJ/m<sup>2</sup>. The fracture surface showed that the higher P steel presents a higher susceptibility to develop intergranular fracture. For the low P content steel, increasing the austenitizing temperature reduced the impact toughness, but it did not presented intergranular fracture.

**Key words:** Quench embrittlement; 5160 steel; Austenitizing; Phosphorus.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais no programa de Pós-Graduação Interunidades da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

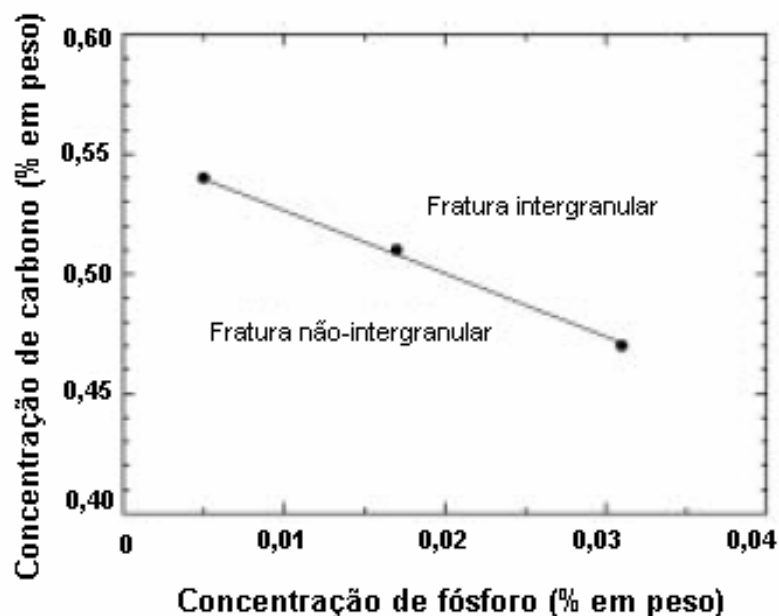
<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico Industrial – RNA Rassini-NHK Auto Peças S/A.

<sup>4</sup> Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

## 1 INTRODUÇÃO

Em sua grande maioria, os feixes de molas são utilizados em veículos de carga e de condução de passageiros, tais como os ônibus e caminhões, e em alguns tipos de automóveis e caminhonetes que os usam em suas suspensões traseiras. Esses feixes de molas são produzidos de aços especiais e seu processo de fabricação envolve as seguintes etapas: corte, puncionamento, forjamento, laminação, tratamentos térmicos (têmpera e revenimento), jateamento por granalhas, pintura, montagem, pré-carga e testes de carga oscilatória.

Durante a austenitização, pode ocorrer um fenômeno de fragilização denominado fragilização por têmpera (*QE*), caracterizada pela segregação do fósforo e pela conseqüente formação de cementita nos contornos de grãos austenísticos, devido ao fato da segregação do fósforo reduzir a solubilidade do carbono na austenita. A segregação do fósforo acentua a fratura intergranular e abaixa o teor de C no qual a fragilização por têmpera aconteceria, especialmente em vista do fato da segregação do fósforo ocorrer durante a austenitização.<sup>(1)</sup> A fragilização por têmpera se desenvolve igualmente em aços com baixos e altos índices de fósforo.<sup>(2)</sup> A Figura 1 apresenta um gráfico associando o modo de fratura com os teores de carbono e de fósforo e para a condição de revenido em baixa temperatura. Porém, Reguly<sup>(3)</sup> relatou que para temperaturas mais baixa de austenitização, os carbeto não dissolvem totalmente e o teor de C da austenita seria menor do que o 0,6%, abaixo do nível crítico necessário para a fratura intergranular.



**Figura 1.** Modo de fratura em função do teor de fósforo e carbono para martensita revenida a baixa temperatura.<sup>(3)</sup>

Além da possível segregação de fósforo, é possível que outros elementos, tais como o manganês e o silício, possam segregar formando filmes muito finos nos contornos de grãos da austenita anterior a têmpera.<sup>(5,6)</sup> Recentemente, foi observado que altos índices de manganês acarretaram a fragilização na têmpera em aços SAE 5140. A partir de dois tratamentos térmicos idênticos, em aços similares, exceto quanto ao teor de manganês (0,82 e 1,83% em peso), Majka observou a partir de ensaios de tração em corpos de prova temperados, que o aço com baixo teor de Mn (0,82% em peso), apresentou fratura por coalescência de microvazios (fratura transgranular dúctil), enquanto que os corpos de prova 1,83% em peso de manganês falharam por fratura intergranular frágil.<sup>(3)</sup>

Tem sido observado que nos aços utilizados para confecção de molas, o teor de P normalmente varia entre 0,010 até 0,025 (% em peso), e fabricantes consideram que este teor não afeta o desempenho deste componente. Assim, conhecendo os efeitos prejudiciais do P, esta pesquisa consiste em se determinar a influência de teores de P, nos limites apresentados na tenacidade ao impacto do aço SAE 5160.

O aço SAE 5160 é um aço-liga que possui elevada resistência à tração e à fadiga, com boa ductilidade e alta temperabilidade. Na condição de temperado, sua dureza varia de 58 a 63 HRC. Este material retém a dureza após o processo de revenimento, possui boas propriedades mecânicas, caso o mesmo seja trabalhado em temperaturas superiores a 300°C. Este tipo de aço-mola é empregado na fabricação de molas altamente solicitadas na indústria automobilística.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

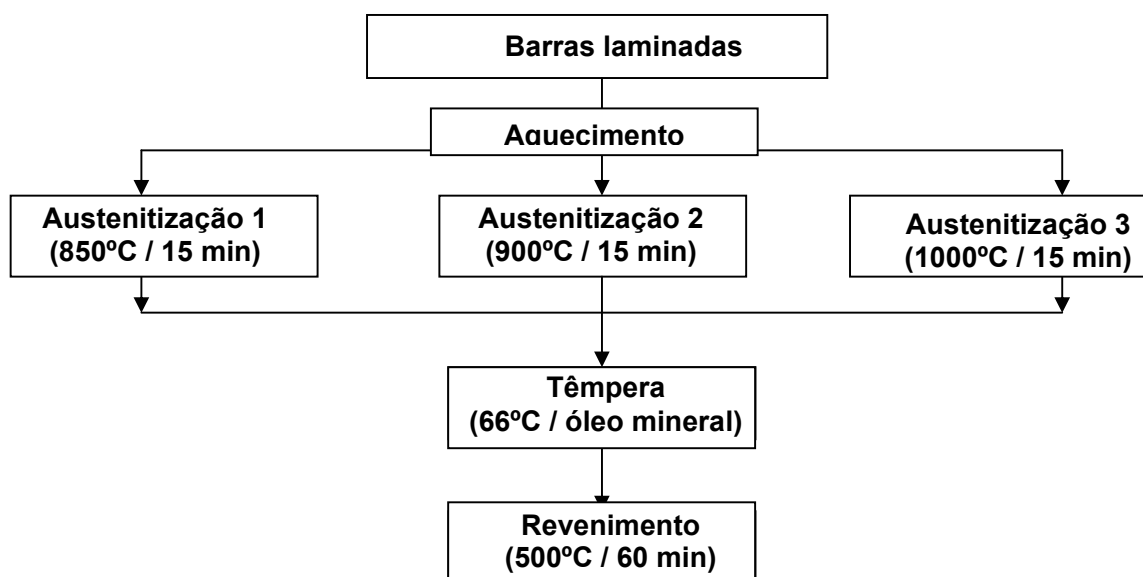
O material utilizado no presente trabalho foi o aço SAE 5160 na forma de barra laminada com bitola de 70 x 10 mm e comprimento de 1000 mm, cuja composição química está fornecida na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química (% em peso) do aço-mola 5160.

	<b>Nominal</b>	<b>Aço 1</b>	<b>Aço 2</b>
<b>C</b>	0,56 – 0,64	0,593	0,584
<b>Mn</b>	0,75 – 1,00	0,860	0,850
<b>P<sub>máx</sub></b>	0,030	<b>0,012</b>	<b>0,025</b>
<b>S<sub>máx</sub></b>	0,035	0,008	0,012
<b>Si</b>	0,15 – 0,35	0,250	0,240
<b>Cr</b>	0,70 – 0,90	0,800	0,780
<b>Ni</b>	0,00 – 0,25	0,070	0,070
<b>Mo</b>	0,00 – 0,06	0,030	0,020
<b>Al</b>	0,00 – 0,04	0,018	0,018
<b>Cu</b>	0,00 – 0,35	0,090	0,190
<b>Sn</b>	0,00 – 0,02	0,008	0,013

## 2.2 Tratamento Térmico

A Figura 2 representa um fluxograma esquemático de tratamento térmico das barras de aço SAE 5160 das quais foram removidos os corpos de prova para ensaio de dureza e tenacidade ao impacto. As barras foram aquecidas gradativamente em um forno contínuo de duas zonas de aquecimento, sendo que na última o tempo de encharque foi de 15 min. Após a austenitização, todas as lâminas foram temperadas em óleo mineral (marca FENSO 39 da ESSO) e revenidas em forno, sempre mantendo as mesmas temperaturas do óleo de têmpera e do revenimento.



**Figura 2.** Fluxograma esquemático do ciclo de tratamento térmico do aço SAE 5160 utilizado neste trabalho.

## 2.2 Ensaio de Dureza e Tenacidade ao Impacto

Após tratamento térmico, foram realizadas medidas de dureza Brinell em um Durômetro Reicherter com uma carga de 3000 kgf e um penetrador de tungstênio com diâmetro de 10 mm. A partir das medidas obtidas, foram calculados as médias com seus respectivos desvios padrões.

Os ensaios de tenacidade ao impacto foram realizados a temperatura ambiente em um equipamento *Instron Wolpert PW30*, com capacidade de 300 J, de acordo com a norma ASTM E-23,<sup>(7)</sup> utilizando corpos de prova Charpy com entalhe em V (profundidade de 2 mm) com dimensões de 50 mm de comprimento e 10 mm de largura e altura.

## 2.3 Fractografias

As superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura para caracterização do modo de fratura.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como observado na Tabela 1, as composições químicas dos dois aços utilizados são semelhantes, com exceção do teor de P e estão dentro dos valores nominais esperados para este aço.

Os resultados da dureza para cada condição estão apresentados na Tabela 2. Para uma mesma temperatura de austenitização, não houve diferença significativa entre os resultados de dureza considerando os teores de P utilizados. Além disso, notou-se que o aumento da temperatura de austenitização causou um leve aumento na dureza na condição de como temperado. O tratamento térmico de revenimento foi capaz de reduzir o nível de dureza para valores especificados nos projetos de molas deste aço, isto é 411 e 432 kgf/mm<sup>2</sup> (44 – 46 HRC).

Tabela 2. Resultados de ensaios de dureza Brinell em kgf/mm<sup>2</sup>.

Temperatura de austenitização	Aço 1		Aço 2	
	Têmpera	Revenido	Têmpera	Revenido
850°C	682,01	417,50	687,93	417,50
900°C	673,25	411,83	670,37	404,91
1000°C	718,72	427,68	682,00	432,16

Os resultados de ensaios de impacto estão apresentados na Figura 3.

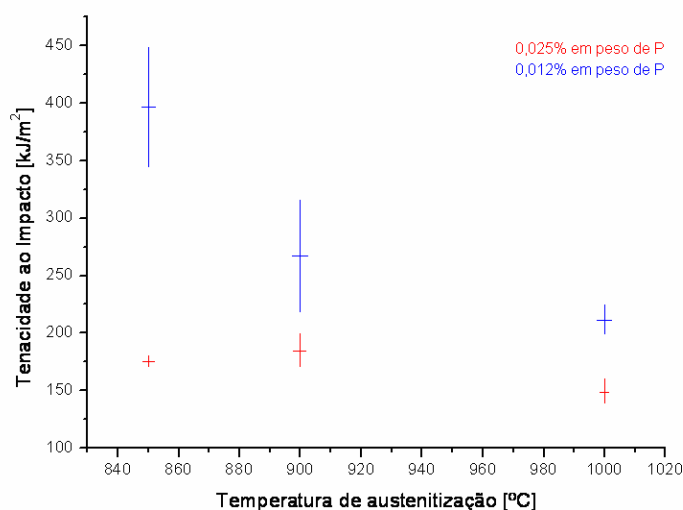


Figura 3. Resultados de tenacidade ao impacto em função do teor de P e da temperatura de austenitização para o aço-mola 5160.

Foi observado que para a temperatura e tempo de revenimento empregados neste trabalho, 500°C e 1 h respectivamente, o aumento do teor de P de 0,012 para 0,025 (% em peso) foi suficiente para provocar uma significativa queda de tenacidade ao impacto (de 400 kJ/m<sup>2</sup> para 170 kJ/m<sup>2</sup>) mesmo para a mais baixa temperatura de austenitização empregada (850°C). Com o aumento da temperatura de austenitização para 900°C e 1000°C, observou-se uma redução na tenacidade ao impacto acentuada no aço de mais baixo teor de P, enquanto que no aço com teor de P de 0,025 (% em peso) a tenacidade ao impacto apresentou somente uma leve queda. Isto provavelmente foi devido ao fato da tenacidade ao impacto já ter atingido um patamar a 850°C. Assim, pode ser inferido que para o aço com 0,025 (% em peso) o mais indicado seria o uso de uma menor temperatura de austenitização para têmpera.

Após o ensaio de impacto, foram analisadas as superfícies de fratura dos corpos de prova em um microscópio eletrônico de varredura. A Figura 4 apresenta os modos de fratura em função do teor de P e da temperatura de austenitização.

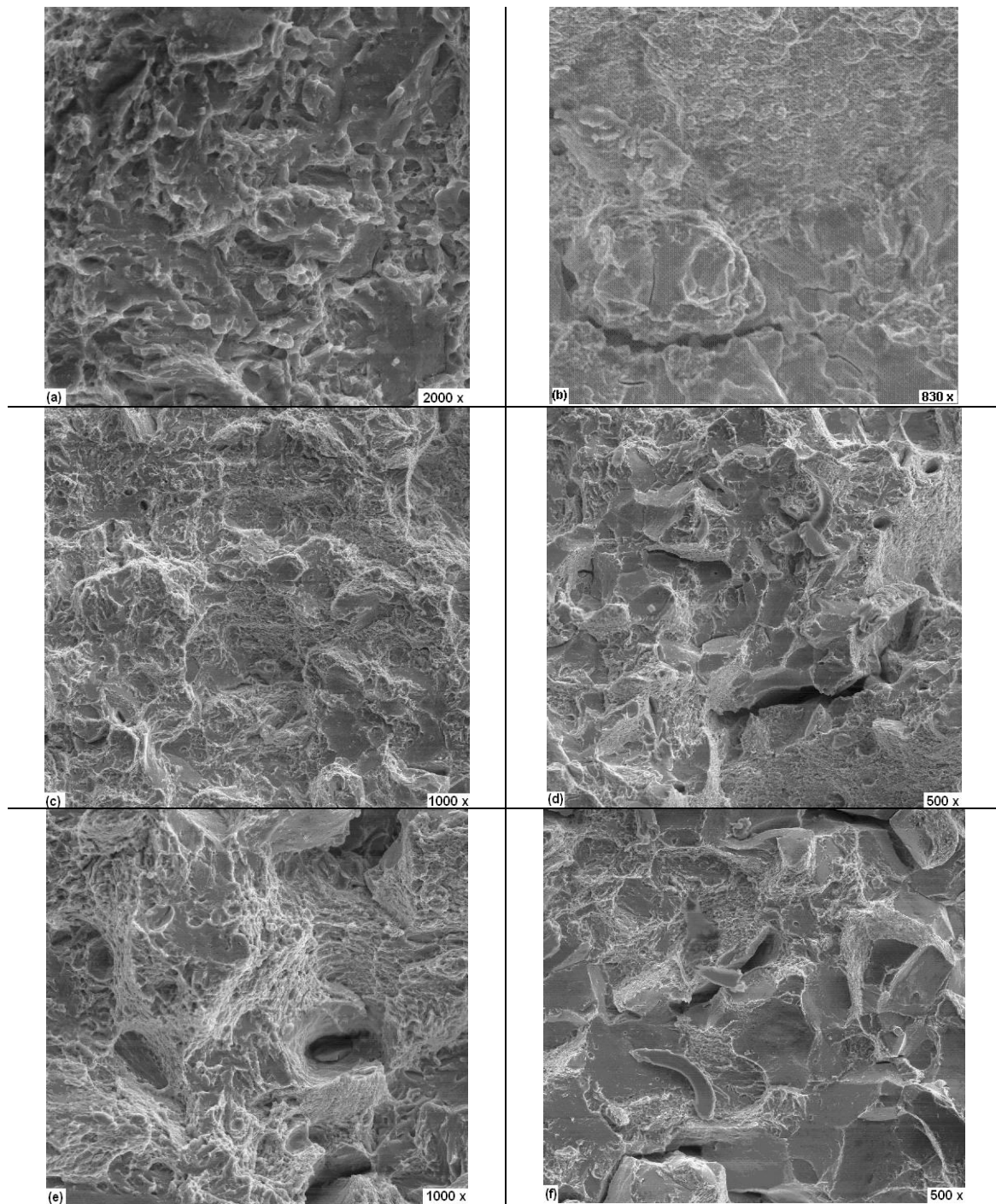
Observando-se as fractografias, apresentadas na Figura 4, pode-se verificar que as amostras austenitizadas a 850°C apresentaram uma superfície de fratura de aspecto dúctil (presença de alvéolos) para um baixo teor de P e com algumas regiões de fratura intergranular para o aço com mais elevado teor de P, sendo estas regiões responsáveis pela queda de tenacidade. Nesta temperatura de austenitização, o valor médio da tenacidade ao impacto foi aproximadamente 126% maior para o aço com baixo teor de P quando comparado com o valor médio obtido para o aço com elevado teor de P. No aço com mais alto teor de P, o aumento da temperatura de austenitização para têmpera, propiciou um aumento gradativo na quantidade de fratura intergranular. Ainda que o aço com baixo P apresentou uma queda de tenacidade ao impacto com o aumento da temperatura de austenitização para têmpera, observou-se sempre uma predominância da fratura por coalescimento de microvazios.

A temperatura de austenitização de 850°C pode ser utilizada para aços 5160, desde que o teor de P seja mantido em níveis próximo a 0,01(%peso). Caso o teor de P esteja acima deste valor, recomenda-se uma redução na temperatura de austenitização para têmpera (respeitando a temperatura mínima de 800°C) (8).

Em suma, conforme mencionado anteriormente, o fósforo possui um efeito bastante nocivo neste tipo de aço e tratamento térmico recomendado para aplicação na fabricação de molas. Recomenda-se a utilização de lâminas de aço-mola com o menor teor de fósforo próximo a 0,01 (% em peso) para que se possa obter a componente mola não-fragilizada.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados deste trabalho pôde-se concluir que a variação do teor de P no aço SAE 5160H, mesmo que abaixo do limite máximo permitido em projeto (0,03%), acarretou uma queda acentuada na tenacidade ao impacto, quando uma temperatura constante de 850°C é utilizada para realizar a austenitização de têmpera.



**Figura 4.** Superfícies de fratura (região central de fratura) dos corpos de prova ensaiados por impacto. Aço com baixo teor de P, austenitizado a (a) 850°C (c) 900°C e (e) 1000°C. Aços com alto teor de P, austenitizado a (b) 850°C, (d) 900°C e (f) 1000°C.

## Agradecimentos

Os autores expressam os seus agradecimentos à RNA Rassini-NHK Auto Peças S/A. pelo fornecimento do material e da bolsa de estudo, bem como ao Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC – USP pelo uso de suas instalações.

## REFERÊNCIAS

- 1 BANERJI, S. K., MCMAHON JR, C. J., FENG, H. C., Metallurgical and Materials Transactions A, EUA, V.9A, p.237 – 247, 2002, *apud* REGULY, A., STROHAECKER, T. R., KRAUSS, G., MATLOCK, D. K., Quench Embrittlement of Hardened 5160 Steel as a Function of Austenitizing Temperature. Metallurgical and Materials Transactions A, EUA, V.35A, p.153 – 162, 2002.
- 2 DARWISH, F. A., PEREIRA, L. C., GATTS, C., GRAÇA, M. L., On the tempered martensite embrittlement in AISI 4140 low alloy steel. Materials Science and Engineering A, EUA, V.A132, p.L5 – L9, 1991.
- 3 REGULY, A., STROHAECKER, T. R., KRAUSS, G., MATLOCK, D. K., Quench Embrittlement of Hardened 5160 Steel as a Function of Austenitizing Temperature. Metallurgical and Materials Transactions A, EUA, V.35A, p.153 – 162, 2002.
- 4 JAMES, B. A., MATLOCK, D. K., KRAUSS, G., MWSP Conf. Pros. ISS, EUA, V.XXXIV, p.579 – 590, 1997, *apud* REGULY, A., STROHAECKER, T. R., KRAUSS, G., MATLOCK, D. K., Quench Embrittlement of Hardened 5160 Steel as a Function of Austenitizing Temperature. Metallurgical and Materials Transactions A, EUA, V.35A, p.153 – 162, 2002.
- 5 WENG, Y., MCMAHON JR, C. J., Interaction of phosphorus, carbon, manganese, and chromium in intergranular embrittlement of iron, Materials Science and Technology, EUA, V.3, p.207 – 216, 1987.
- 6 BODNAR, R. L., OHHASHI, T., JAFFEE, R. I., Effects of Mn, Si, and Purity on the Design of 3,5NiCrMoV, 1CrMoV, and 2,25Cr-1Mo Bainitic Alloy Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, EUA, V.20A, p.1445 – 1460, 1989.
- 7 ASTM E23 – 02a. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standards, V.14.01, 2002.
- 8 GUPTA, B. K., Austenitizing Temperatures for Hardening Carbon and Low-Alloy Steels. ASM Handbook: Heat treating (prepared under the direction of the ASM Handbook Committee), EUA, V.4, p. 28 – 30, 1991.