

INFLUÊNCIA DO VANÁDIO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS MÉDIO TEOR DE CARBONO PARA MOLAS DE SUSPENSÃO¹

*Gustavo Levy Canaan²
G. Cristina Durães de Godoy³
Francisco Boratto⁴
Berenice Mendonça⁵
Fábio da Silva Borchardt⁶
Leandro Aparecido Marchi⁶*

Resumo

Foi caracterizada comparativamente a variação das propriedades mecânicas de dois aços, nas várias etapas de fabricação da mola de suspensão, com o objetivo de se determinar a influência da adição de vanádio neste fenômeno. Foram também determinadas as melhores condições de revenimento do aço com vanádio que otimizam os valores das propriedades mecânicas desejadas. Observaram-se melhorias nas propriedades combinadas de resistência e ductilidade no aço modificado com vanádio, além de um refino do grão austenítico do mesmo.

Palavras-chave: Vanádio; Têmpera; Revenimento; Molas; Suspensão.

INFLUENCE OF VANADIUM IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF A MEDIUM CARBON STEEL FOR SUSPENSION SPRINGS

Abstract

The variation in the mechanical properties, during all phases of a suspension spring production, was measured in order to estimate the influence of vanadium addition. The best conditions of the tempering treatment for the steel with modified chemical composition were also evaluated in order to optimize the desired final mechanical properties. The results show that the steel with vanadium addition present better characteristics of strength and ductility than the steel without vanadium addition.

Key words: Vanadium; Quenching; Tempering; Suspension; Spring.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *MSc., Analista de Produto, Belgo-Arcelor Mittal – Unidade João Monlevade*

³ *Dr., Professora do Depto. de Metalurgia e Materiais da UFMG*

⁴ *PhD., Consultor Senior, Belgo-Arcelor Mittal – Unidade João Monlevade*

⁵ *Dr., Professora do Depto. de Metalurgia e Materiais da UFMG*

⁶ *MSc., Analista de Laminação, Belgo-Arcelor Mittal – Unidade João Monlevade*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente várias pesquisas têm sido feitas no intuito de desenvolver componentes de automóveis mais leves para atingir os requisitos de redução de peso e conseqüente economia de combustível e de energia, principalmente em decorrência do fenômeno de aquecimento global. A redução de peso nestes componentes implica no desenvolvimento de aços de mais alta resistência, com propriedades mecânicas melhoradas, sem a degradação de outras propriedades importantes, como a ductilidade e/ou a conformabilidade do material.

Uma das formas utilizadas para atingir os requisitos de aumento de resistência é a adição de elementos microligantes como nióbio e vanádio. Estes elementos aumentam a resistência dos aços através dos mecanismos de endurecimento por precipitação e refino de grão.

Este trabalho foi realizado visando-se avaliar o efeito da adição de vanádio a aços de médio teor de carbono produzidos atualmente pela Belgo-Arcelor Mittal e objetivando-se determinar as melhores condições de beneficiamento de maneira a otimizar as propriedades mecânicas deste aço com composição química modificada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Aços microligados vêm sendo desenvolvidos durante os últimos 40 anos e vêm se transformando em uma importante classe de materiais de alta resistência. Apesar destes desenvolvimentos, o consumo total de aços microligados é atualmente estimado em apenas 10 a 15% da produção mundial de aços, quantia equivalente a aproximadamente 150 milhões de toneladas. Com isso, há um grande potencial de crescimento, pois são materiais que geram fortes benefícios econômicos, tanto para os produtores quanto para os consumidores de aço.⁽¹⁾

O sucesso dos aços microligados é devido a dois mecanismos de endurecimento complementares: o refino do grão e o endurecimento por precipitação. Um significativo endurecimento é causado pela precipitação de carbonetos e carbonitretos dos elementos microligantes na ferrita. Como a solubilidade destes compostos na ferrita é muito menor do que na austenita, há uma supersaturação destes compostos, que é a força-motriz para a precipitação. Os elementos utilizados para este fim devem combinar para o refino do grão e também para a formação destes precipitados.

A adição de vanádio é um dos métodos que pode ser utilizado para aumentar a resistência mecânica de um aço por este processo.

Neste estudo foram utilizados dois aços de médio/alto carbono ligados ao cromo e ao silício produzidos na Belgo-Arcelor Brasil, cujas composições químicas típicas estão ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos aços estudados (% em peso)

Aço	C	Mn	Si	Cr	V	N2
Padrão	0,54 – 0,60	0,60 – 0,80	1,20 – 1,60	0,60 – 0,80	-	0,006
Padrão+ V	0,58 – 0,62	0,35 – 0,65	1,35 – 1,60	0,40 – 0,70	0,15 – 0,25	0,006

Foram fabricadas na aciaria duas corridas de 130t, cada uma com a composição química média de cada aço da Tabela 1.

Os tarugos produzidos na máquina de lingotamento contínuo foram laminados em um trem de laminação a quente contínuo para a fabricação de fios-máquina na bitola de 12,70mm, conforme prática padrão para o aço. Foram laminados seis tarugos de cada corrida.

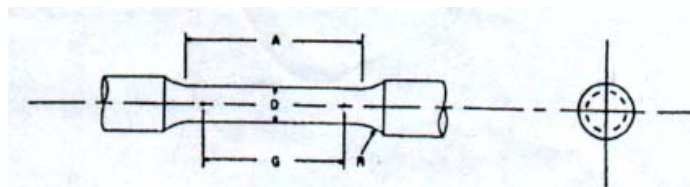
Amostras dos rolos de fio-máquina gerados foram retiradas. Após o Stelmor®, sistema de resfriamento a ar através da utilização de ventiladores localizado após a última cadeira de laminação, foi feita a caracterização do material. A amostragem foi feita na cauda da bobina após o descarte de ponta, feito para eliminar possíveis defeitos de laminação.

O fio-máquina foi, então, enviado a uma unidade de trefilação de barras, para serem fabricadas barras trefiladas para bitola de 12mm para os dois tipos de aços, uma vez que esta etapa faz parte do processo de produção. Nesta etapa, foram retiradas amostras das barras trefiladas.

Esta análise consistiu na comparação da microestrutura, em termos de nível de inclusões, quantidade de perlita resolvida, tamanho de grão austenítico prévio, grau de decarbonetação e formação de rede de cementita, com os padrões definidos para este aço.

Foi determinado, na temperatura ambiente, o valor das propriedades mecânicas tanto do fio-máquina laminado quanto da barra trefilada dos dois aços mencionados na Tabela 1. Os valores destes parâmetros foram calculados a partir de uma média de no mínimo três ensaios.

Os testes para se medir as propriedades mecânicas foram realizados em amostras usinadas com a geometria e dimensões mostradas na Figura 1, conforme especificado na norma ASTM370-97a.



A – comprimento mínimo da seção reduzida = 32mm

R – raio mínimo de concordância = 5mm

D – diâmetro = $6,25 \pm 0,12$ mm

G – comprimento útil = $25,0 \pm 0,10$ mm

Figura 1. Geometria e dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração

Os testes de tração foram feitos em uma máquina universal de ensaios marca INSTRON, modelo 5582, automatizada com “software” Séries IX, em ambiente “Windows”, para controle, aquisição e tratamento de dados. Foi utilizado extensômetro longitudinal marca INSTRON, modelo 2630-112, com base de 25mm, para obtenção do limite de escoamento. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM A370-97a, utilizando-se uma taxa de deformação de 10^{-3} s⁻¹.

A medida da redução de área na estricção foi feita com auxílio de paquímetro digital marca MITUTOYO, modelo DIGIMATIC Caliper.

O tratamento de têmpera foi feito austenitizando-se as amostras dos dois tipos de aços descritos na Tabela 1 a uma temperatura de 920°C em um forno tipo Mufla com controlador digital ANALOGICA por um tempo de 1h, simulando as condições industriais, e posterior resfriamento em óleo na temperatura de 60°C.

A microestrutura do material temperado para os dois tipos de aços em estudo foi avaliada em termos de tamanho de grão austenítico (TGA). O tamanho de grão austenítico é um parâmetro microestrutural importante porque tem grande influência na temperabilidade e nas propriedades mecânicas de aços para beneficiamento.

Para revelação do TGA, foram utilizados os procedimentos descritos na norma ASTM E112. O reagente de ataque foi baseado em ácido pícrico com inibidor (detergente), de acordo com a norma. Para a determinação do TGA foi utilizado o método planimétrico.

Para caracterização do material após revenimento, foram medidos os valores das propriedades mecânicas em amostras dos aços tratadas em diferentes temperaturas por um tempo fixo de 1h. Foram utilizadas temperaturas de tratamento de 350 a 550°C. A caracterização do comportamento mecânico das amostras tratadas em cada uma das temperaturas, em termos de propriedades mecânicas a tração, foi feita adotando-se as mesmas metodologias já descritas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais foram bastante significativos. A análise metalográfica dos dois aços, tanto por microscopia óptica quanto por microscopia eletrônica de varredura revelou estruturas bastante similares. Como se pode constatar na Figura 2, a estrutura dos aços são predominantemente perlíticas.

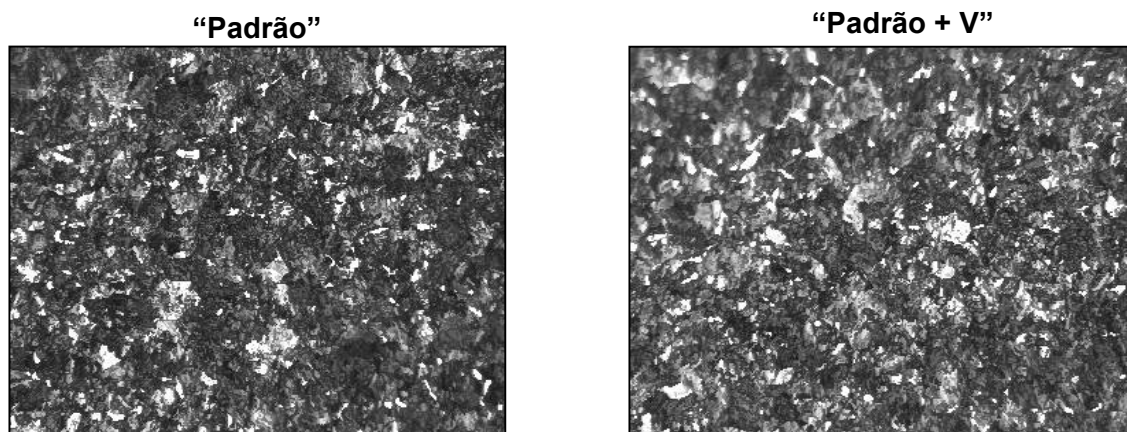


Figura 2. Microestrutura da seção transversal do fio-máquina com diâmetro de 14,30mm. Ataque Nital 2%. Aumento 200X.

As propriedades mecânicas, expressas em termos do limite de resistência (R_m) e da redução de área na estrição (Z), foram medidas no fio-máquina e na barra trefilada dos dois tipos de aços e os resultados estão mostrados na Tabela 2. Foram realizados também testes estatísticos objetivando-se comprovar se os dados medidos são estatisticamente diferentes ou são apenas variações de medidas. Estes testes mostraram, com 95% de confiança, que as médias dos valores medidos são estatisticamente diferentes levando em conta a variabilidade encontrada.

Tabela 2. Propriedades dos aços nas condições de fio-máquina e barra trefilada.

Propriedade Mecânica	Padrão	Padrão+V
R _m - Fio-Máquina (MPa)	997 ± 21	1147 ± 16
Z - Fio-Máquina (%)	43 ± 4	42 ± 4
R _m - Barra trefilada (MPa)	1136 ± 9	1284 ± 25
Z - Barra Trefilada (%)	46 ± 3	36 ± 2

Os dados mostram que os limites de resistência (R_m) do fio-máquina e da barra trefilada do aço microligado ao vanádio são cerca de 150MPa maior do que o aço sem a presença do microligante. Estes resultados estão de acordo com Glodowski,⁽²⁾ que informa que a resistência de um aço aumenta de 10 a 16MPa para cada 0,01% de vanádio adicionado.

Os dados de ductilidade demonstram que, para ambas as condições (fio-máquina e barra trefilada), os dois aços apresentam boa conformabilidade com Z maior do que 35%, valor geralmente especificado pelos clientes deste produto.

Com o objetivo de verificar a influência do vanádio no refinamento do tamanho de grão austenítico (TGA), foram realizadas medidas deste parâmetro em função do tempo de austenitização para uma temperatura definida (T = 920° C) para os dois tipos de aços e os resultados são mostrados na Figura 3.

A figura ilustra que o aço microligado ao vanádio apresenta tamanho de grão austenítico mais fino do que o aço comum. Este refinamento do grão é atribuído à precipitação dos carbonetos de vanádio após o processo de laminação a quente. De acordo com Barani e co-autores,⁽³⁾ para uma concentração de 0,55% de carbono, os carbonetos são termodinamicamente instáveis acima de uma temperatura determinada pelo equilíbrio termodinâmico entre as fases presentes. A dissolução dos carbonetos de vanádio é controlada pela cinética e, conseqüentemente, suficiente tempo é necessário para que ela ocorra. Antes da dissolução dos carbonetos, os grãos são ancorados (*pinned*) pelos carbonetos não-dissolvidos e seu crescimento é inibido. Então, mesmo para maiores tempos de austenitização, o aço microligado ao vanádio apresenta grãos mais finos do que o aço sem vanádio.

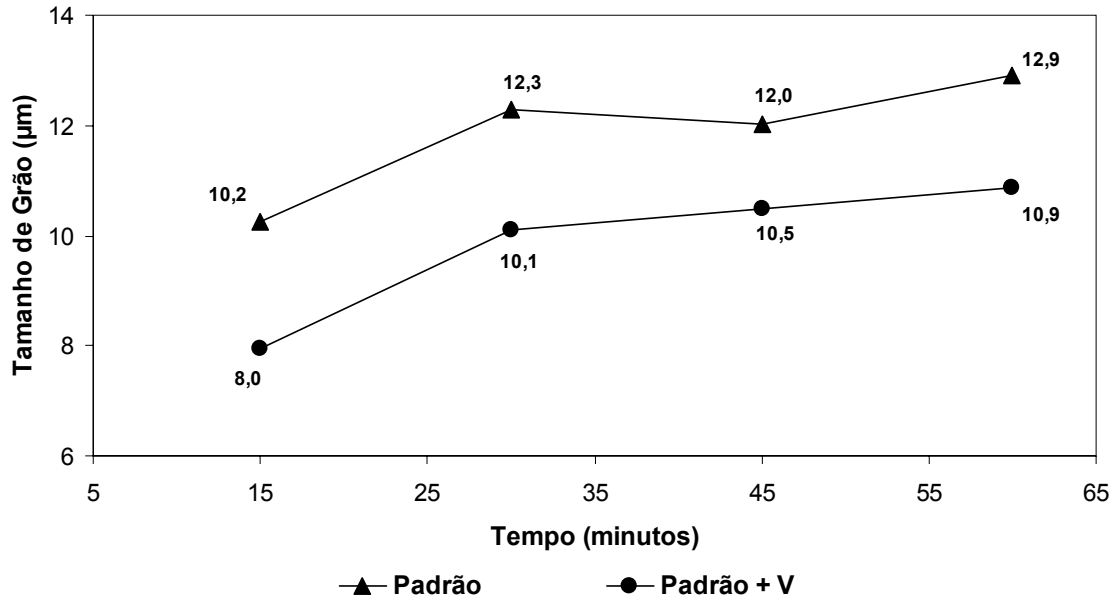


Figura 3. Tamanho de grão austenítico (TGA) em função do tempo, para uma temperatura de austenitização de 920° C.

As Figuras 4 e 5 ilustram as variações das propriedades mecânicas de resistência (expressa em termos de limite de resistência) e de ductilidade (expressa em termos de redução de área na estrição) em função de várias temperaturas de revenimento, de maneira a simular as condições de tratamento térmico do componente mecânico.

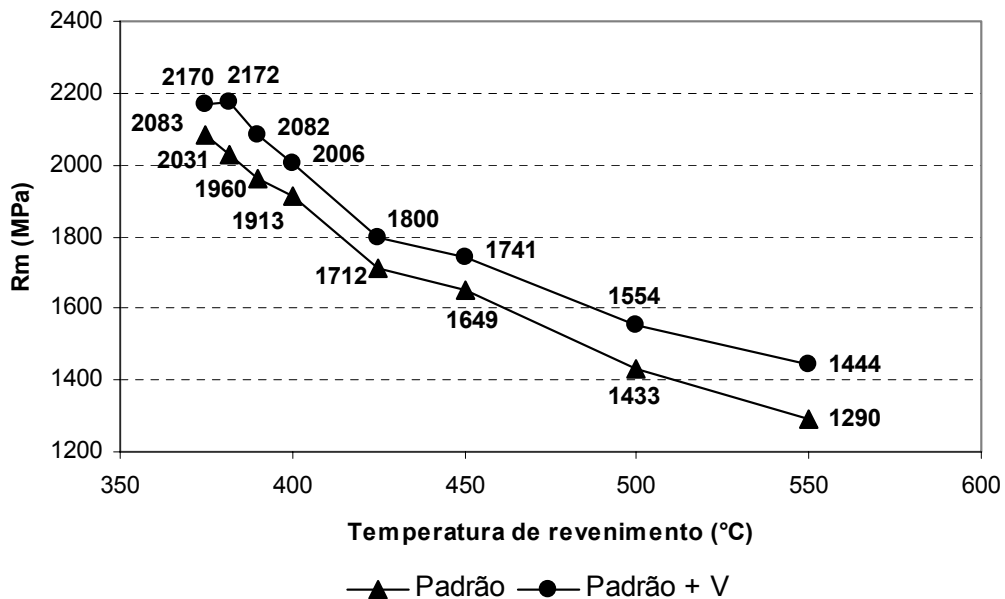


Figura 4. Curva de resistência obtida após o revenimento.

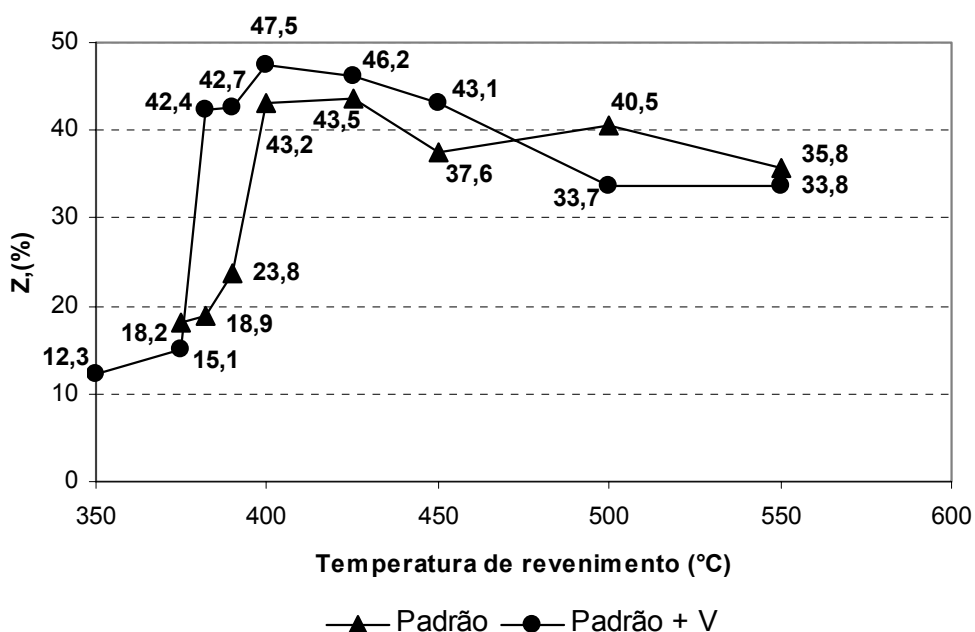


Figura 5. Curva de ductilidade obtida após o revenimento.

Os resultados obtidos confirmam que o aço microligado ao vanádio é cerca de 100 a 150MPa mais resistente que o aço comum para todas as temperaturas de revenimento simuladas. A teoria estudada mostra que na temperatura de revenimento em torno de 350°C, em adição a grande quantidade de VC, a precipitação de carboneto épsilon e de cementita contendo Cr e V torna-se evidente, conforme Figura 6, e o aço exibe a resistência máxima conforme curva de resistência da Figura 4. Com o aumento da temperatura de revenimento, a resistência do aço começa a diminuir continuamente, principalmente pela conversão do carboneto ϵ em cementita. A cementita coalesce e a matriz torna-se mais macia.⁽⁴⁾

A curva de ductilidade ilustra que o aço microligado ao vanádio apresenta valores bem superiores de redução de área nas temperaturas entre 380 e 390°C demonstrando a diferença de comportamento dos materiais nesta faixa de temperatura de revenimento. O aço com vanádio apresenta um comportamento mais dúctil em relação ao aço comum, que pode ser conseqüência do menor tamanho de grão austenítico comprovada pelas medições realizadas e apresentadas na Figura 3. Barani e co-autores demonstraram que esta menor ductilidade do aço sem vanádio pode ser explicada pela presença de filmes de carbonetos nos contornos de grão austeníticos pré-existentes que fragilizam o aço em determinadas temperaturas. Em temperaturas superiores a 400°C, estes carbonetos começam a esferoidizar. Estes filmes não foram vistos nos aços contendo vanádio. Ao invés disso, foram visualizadas ilhas ferríticas nos contornos de grão austeníticos prévios, podendo ser resultado da presença de carbonetos de vanádio não dissolvidos que localmente reduzem a concentração de carbono na austenita e, conseqüentemente, aumentam a temperatura A_{r3} .

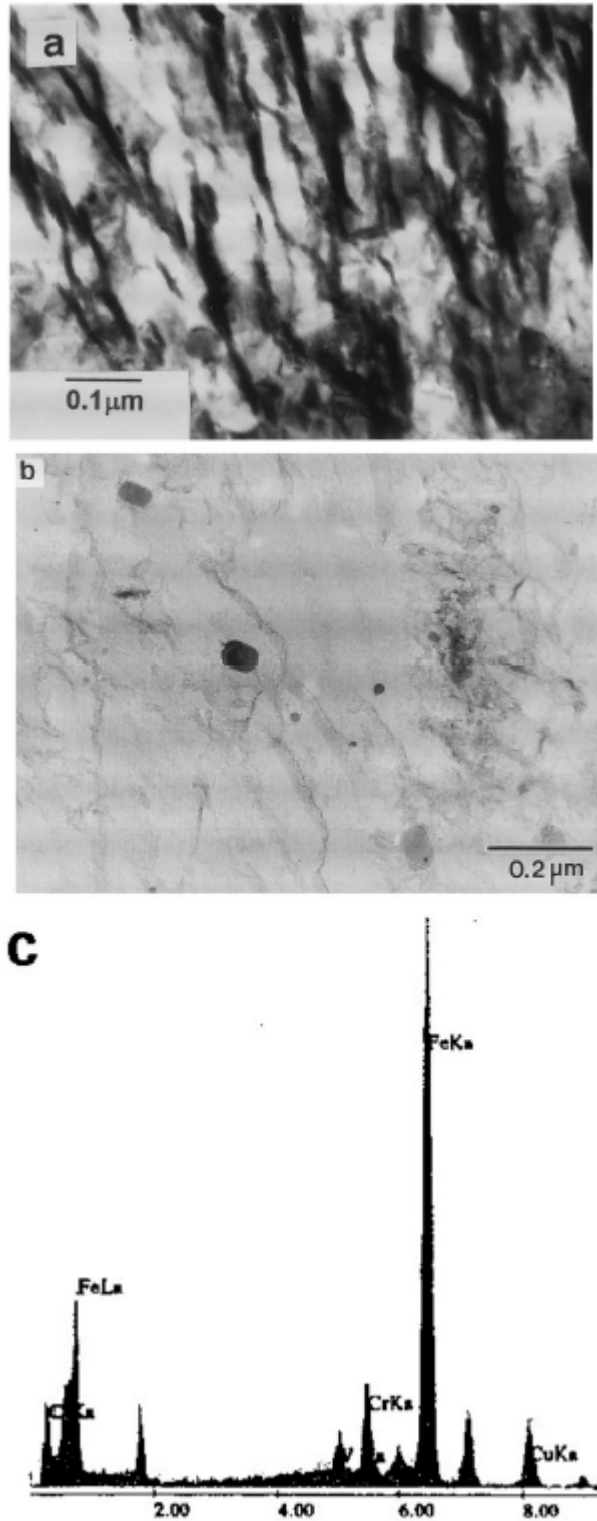


Figura 6. Imagens de microscopia eletrônica de transmissão mostrando (a) carboneto ϵ , (b) cementita contendo Cr e V (réplica); e (c) resultado de EDX da cementita contendo Cr e V (temperatura de revenimento: 350°C).⁽⁴⁾

Porém, as propriedades requeridas pelas molas de suspensão necessitam aliar alta resistência com boa ductilidade em uma microestrutura temperada e revenida. A Figura 7 sumariza os resultados dos testes de tração para os vários tratamentos de revenimento realizados nos dois tipos de aços. Os resultados mostram que uma melhoria combinada das propriedades de resistência e conformabilidade pode ser obtida com a presença do vanádio.

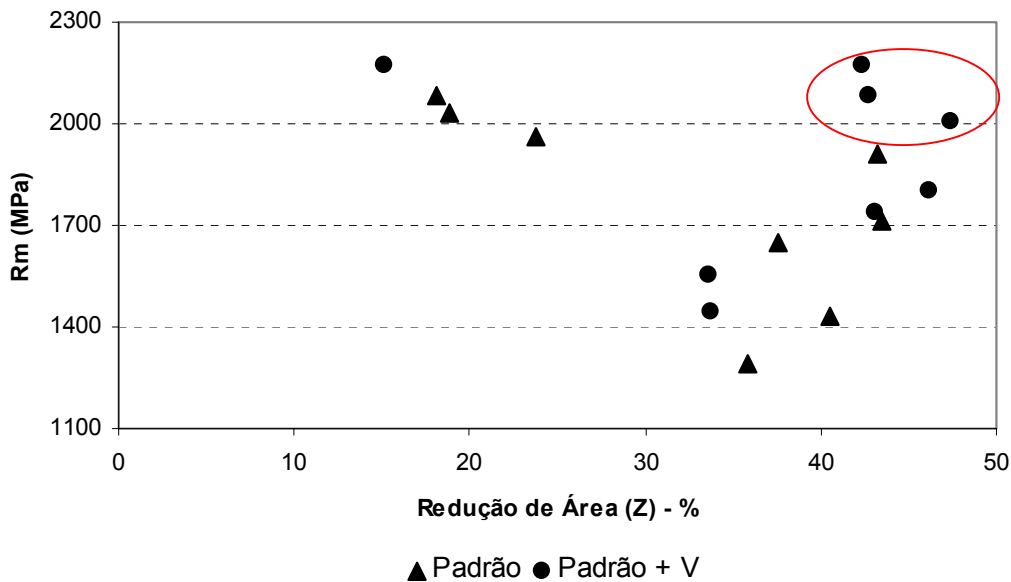


Figura 7. Combinação de limite de resistência e redução de área, nas diversas temperaturas de revenimento.

Com isso, torna-se possível a fabricação de molas de suspensão com limites de resistência superiores a 2150MPa aliada a uma ductilidade superior a 40% em temperaturas de revenimento entre 380 e 390°C. Conseqüentemente, as molas apresentam melhores propriedades de tenacidade e limite de resistência à fadiga, tendo um melhor desempenho em sua solicitação.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho pôde-se evidenciar que a adição de vanádio implicou em melhoria das propriedades de resistência mecânica de um aço para beneficiamento, comumente utilizado na fabricação de molas de suspensão. A presença do vanádio aumentou a resistência do aço tanto na condição de laminado e trefilado, como também na condição de beneficiado.

Foi possível também otimizar as condições de revenimento do aço de composição química modificada, indicando a faixa de temperatura a ser utilizada no beneficiamento, de maneira a aliar melhores propriedades mecânicas de resistência e ductilidade, e garantindo assim maximização de desempenho da mola no automóvel.

Foi evidenciado, também, que a presença do vanádio refina o grão austenítico do material e, conseqüentemente, melhora as propriedades de tenacidade do componente.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Belgo-Arcelor Mittal, Unidade de João Monlevade, pelo suporte e autorização para publicar este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 KORCHINSKY, M. A new role for microalloyed steels – adding economic value. **Vanitec International Symposium**, Beijing, China, 2001
- 2 GLODOWSKI, R.J.. Vanadium in medium and high carbon steels. **Vanitec International Symposium**, Beijing, China, 2001
- 3 BARANI, A.A., FEI, L., ROMANO, P., PONGE, D. Effect of vanadium and thermomechanical treatment on the properties of 55SiCr6, *Max Planck*, Düsseldorf, 2005
- 4 LEE, C.S., LEE, K.A., LI, D.M., YOO, S.J., NAM, W.J. Microstructural influence on fatigue properties of a high-strength spring steel. **Materials Science and Engineering**, A241, p. 30-37, 1998