

# TRATAMENTO TÉRMICO, MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DE AÇO INOXIDÁVEL PARA CUTELARIA PROFISSIONAL<sup>1</sup>

*Clenice Moreira Galinari<sup>2</sup>  
Paulo Sérgio de Sairre Bálamo<sup>3</sup>  
Wander Luiz Vasconcelos<sup>4</sup>*

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tratamento térmico e teor de carbono na microestrutura e propriedades de um aço inoxidável martensítico com aplicação em cutelaria profissional. Para isto, produziu-se ligas com diferentes teores de carbono tendo por base a composição da Norma DIN 1.4110. Dessas ligas foram obtidas amostras dilatométricas sendo realizado um estudo de todas as etapas do tratamento térmico; e também foram obtidas amostras laminadas, as quais foram submetidas aos tratamentos térmicos em fornos de laboratório e então avaliadas as propriedades e microestrutura. Os tratamentos envolvem as etapas de recozimento, austenitização, têmpera ao ar, têmpera subzero e revenimento. O tipo de carboneto formado em todas as ligas e etapas do tratamento térmico foi o  $M_{23}C_6$ , com aproximadamente 53%Cr, 36%Fe, 3%Mo e 8%C, no formato esferoidal. Temperaturas de austenitização mais altas promoveram maior dissolução dos carbonetos presentes no estado recozido, retornando carbono e cromo para a matriz, o que diminuiu o ponto Ms. À partir de 0,4% C o comportamento da microestrutura e propriedades tendeu a uma estabilização.

**Palavras-chave:** Inoxidáveis martensíticos; Tratamento térmico; Carbonetos.

## **HEAT TREATMENT, MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF STAINLESS STEEL FOR PROFESSIONAL CUTLERY**

### **Abstract**

The objective of this work is to know the influence of the heat treatment and carbon content in microstructure and properties of martensitic stainless steel for professional cutlery. Alloys with different carbon contents were prepared with base on DIN 1.4110. These alloys were submitted to dilatometer evaluation and heat treatment for annealing, austenitizing, air quenching, subzero quenching and tempering in laboratory furnaces. After the samples had their microstructures and properties analysed.  $M_{23}C_6$  kind carbides with approximate 53%Cr, 36%Fe, 3%Mo and 8%C were identified in every steps of the heat treatment. Higher austenitizing temperatures caused more dissolution of the carbides present in annealed material, returning carbon and chromium in to matrix, reducing Ms point. After 0.4%C microstructure and properties had a tendency to stabilization.

**Key words:** Martensitic stainless steel; Heat treatment; Carbides.

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

<sup>2</sup> *Engenheira Metalurgista, doutora, Magnesita S.A.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Mecânico, doutor, Acesita S.A.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Metalurgista, PhD, Universidade Federal de Minas Gerais.*

# 1 INTRODUÇÃO

Instrumentos de corte utilizados em frigoríficos, abatedouros, açougues, cozinhas industriais e outros estabelecimentos, compõem a Cutelaria Profissional. Os aços para esse segmento precisam apresentar características como: boa resistência à corrosão devido à utilização constante em meios úmidos e para evitar contaminação dos alimentos; boa tenacidade para evitar quebra das lâminas e boa resistência ao desgaste para prolongar a vida útil dos instrumentos.<sup>[1]</sup> Os aços que melhor combinam essas características são os “inoxidáveis martensíticos médio e alto carbono”, como os indicados pelas Normas DIN 1.4110 e 1.4116; são aços complexos que exigem controle e domínio de cada etapa do seu processamento. Atualmente são poucos os fornecedores mundiais e grande o mercado potencial para esse tipo de aço.

Para se obter todas as características mencionadas, faz-se necessária a aplicação de uma série de tratamentos térmicos após a solidificação do material: recozimento, austenitização, têmpera ao ar, têmpera subzero e revenimento.

O objetivo deste trabalho é avaliar, para um aço com base na Norma DIN 1.4110 apresentando teores de carbono diferentes, a influência das etapas de tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

Foram produzidas quatro ligas de aço inoxidável martensítico contendo 13%Cr, 0,5%Mo, 0,2%Mn e 0,4%Si buscando variar somente o teor de carbono. Três dessas ligas (A, B e C) foram produzidas em escala de laboratório com respectivamente 0,28%C, 0,52%C e 0,67%C e uma liga foi produzida em escala industrial pela Acesita S.A. com 0,43%C.

### 2.2 Método

Após solidificação, as quatro ligas de aço inoxidável martensítico passaram pelos seguintes processos:

Laminação à Quente ⇒ Recozimento ⇒ Austenitização ⇒ Têmpera ao Ar ⇒ Têmpera Subzero ⇒ Revenimento

Procedimento e objetivo de cada processo:<sup>[1,2,3]</sup>

- Laminação à Quente: condução do material entre os cilindros de laminação até a redução da espessura original a uma chapa de 3mm, aplicando temperatura máxima de 1200°C.

- Recozimento: aquecimento até temperaturas da ordem de 800°C e resfriamento lento, dentro do forno com atmosfera controlada. O objetivo é obter uma estrutura ferrítica (sem a formação de martensita) para que o material apresente baixa dureza (em torno de 90HRB) e possa ser trabalhado (cortado, prensado, laminado) de modo a receber a forma do produto final no cliente antes das demais etapas de tratamento térmico.

- Austenitização: aquecimento até temperatura superior à 1000°C e estabilização nessa temperatura, com o objetivo de se obter uma estrutura completamente austenítica.
- Têmpera ao Ar: resfriamento rápido (taxa em torno de 20°C/s) à partir da temperatura de austenitização, objetivando a transformação martensítica.
- Têmpera subzero: resfriamento à temperatura inferior à 0°C objetivando transformar a austenita que tenha permanecido retida, em martensita.
- Revenimento: aquecimento à temperaturas entre 200°C e 300°C para alívio de tensões.

Foram confeccionadas amostras nas dimensões apropriadas a cada ensaio (dilatométrico, dureza, tração, análise de microestrutura) à partir do material recozido e então aplicados os tratamentos térmicos mencionados acima, em laboratório. Após cada etapa de tratamento térmico, foram realizados os ensaios e análise ao microscópio; exceto o ensaio de tração, o qual foi realizado após o tratamento completo, ou seja, nas amostras revenidas.

### 2.3 Preparação e Análise das Amostras

Através do estudo dilatométrico, buscou-se identificar os pontos de transformação da austenita (início = Ac1 e fim = Ac3) e da martensita (Ms), assim como avaliar a influência do teor de carbono e dos parâmetros de tratamento nesses pontos de transformação de fases.

À partir do aço recozido, as amostras dilatométricas foram usinadas na forma de pequenos tubos (comprimento 12mm, diâmetro exterior 2mm, diâmetro interior 1,2mm).

Foi utilizado um dilatômetro ADAMEL DT1000 programável com aquecimento rápido e resfriamento rápido por jatos de hélio (Centre de Recherches d'Ugine – CRU – França).<sup>[4]</sup> A têmpera subzero foi igualmente realizada com a ajuda de jatos de hélio gasoso previamente resfriado pela passagem através de nitrogênio líquido. O alongamento da amostra foi transmitido para uma célula de medida por intermédio de haste e suporte de quartzo. Os ciclos térmicos realizados foram medidos com a ajuda de 2 fios de termopar chromel-alumel de 0,2mm soldados separadamente ao meio da amostra.

As condições utilizadas (temperaturas, tempos) foram estabelecidas à partir de dados de literatura e valores utilizados pela indústria couteleira. Os dois valores de patamar de austenitização (1060°C e 1080°C) foram definidos tendo em vista a recomendação da literatura para a faixa entre 1000°C e 1100°C.<sup>[5]</sup> A velocidade de têmpera tem menor influência nas características finais, desde que seja superior à uma velocidade crítica onde ocorre reprecipitação de carbonetos nos contornos de grão da austenita;<sup>[6]</sup> no estudo dilatométrico foram aplicadas duas velocidades de têmpera (20°C/s e 2°C/s) e para o estudo das amostras laminadas, optou-se por uma velocidade (15°C/s).

A dureza Rockwell-C (carga de 141N) foi medida em amostras de 30mm x 50mm. Tais amostras foram cortadas, embutidas e polidas para análise da microestrutura. Utilizou-se o reagente químico Vilella (95ml álcool etílico, 1g ácido pícrico, 5ml ácido clorídrico) que revela a matriz (ferrita, austenita, martensita) e os carbonetos; e Groesberck (4g permanganato de potássio, 4g hidróxido de sódio, 100ml água destilada) que revela apenas os carbonetos. As amostras foram submetidas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV XL30 Philips) e microssonda (JXA 8900RL Jeol) para análise química. Para verificar a quantidade de carbonetos, foram

micrografados 40 campos ao longo da espessura das amostras com 3000X de aumento no MEV, e submetidos ao analisador de imagens LECO IA-3001.

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram confeccionados segundo Norma ASTM<sup>[7]</sup> para chapas, com comprimento total de 200mm, largura de 20mm e espessura de 2,85mm. Foi utilizada máquina Instron modelo 5583 para a realização dos ensaios.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Estudo Dilatométrico

Foram aplicados os seguintes ciclos térmicos:

##### **Austenitização:**

1) Temperatura de patamar de **1060°C** mantida durante 5min. Aquecimento à 2°C/s.

2) Temperatura de patamar de **1080°C** mantida durante 5min. Aquecimento à 2°C/s.

##### **Têmpera:**

1) Resfriamento à **2°C/s** até 20°C. Mantido por 5min à 20°C.

2) Resfriamento à **20°C/s** até 20°C. Mantido por 5min à 20°C.

##### **Têmpera subzero:**

Resfriamento a 10°C/s até **-120°C**. Mantido 10min à -120°C. Retorno 20°C à 10°C/s.

##### **Revenimento:**

Subida até 260°C à 50°C/s. Mantido por 90min à **260°C**. Retorno à 20°C.

Foram obtidas as curvas dilatométricas “alongamento relativo x temperatura”, e os pontos de transformação foram determinados com a ajuda das curvas derivadas “d(alongamento relativo)/d(temperatura)”. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos para as temperaturas de início (Ac1) e fim de austenitização (Ac3), e para a temperatura de início da transformação martensítica (Ms).

Durante o resfriamento, no domínio de 360°C a 150°C, foi observado mais de um ponto de dilatação, sendo determinado mais de um ponto Ms. Para cada caso foram indicados dois pontos de início da transformação martensítica. Segundo a literatura,<sup>[5]</sup> o ponto Ms de temperatura mais elevada corresponderia à transformação da matriz homogênea em martensita, e o ponto Ms de temperatura mais baixa, corresponderia às regiões da matriz “próximas aos carbonetos residuais”.

**Tabela 1** – Resultados do estudo dilatométrico (Ac1, Ac3, Ms).

Ligas	Ac1 (°C)	Ac3 (°C)	Pontos Ms sucessivos (°C)			
			1060°C -20°C/s	1060°C -2°C/s	1080°C -20°C/s	1080°C -2°C/s
A=0,3%C	873	930	349	370	264	325
			278	330	234	285
B=0,5%C	868	920	266	333	225	315
			235	274	196	262
C=0,7%C	864	920	250	324	234	303
			210	268	188	240

Os patamares diferentes (1060 e 1080°C) e as velocidades (-2°C/s e -20°C/s) não influenciaram Ac1 e Ac3, sendo definido um valor para cada liga.

Com base nos dados da Tabela 1 verifica-se:

Ocorre um pequeno abaixamento na temperatura Ac1 à medida que o teor de carbono aumenta (de aproximadamente 12°C quando passa de 0,3%C para 0,7%C). Conforme fontes da literatura,<sup>[8]</sup> os pontos Ac1 no equilíbrio das corridas estudadas seriam da ordem de 835°C (ligas B e C) a 845°C (liga A). Houve então um retardo na transformação de aproximadamente 20°C, por razões cinéticas, como a difusão. Os tratamentos térmicos efetuados foram curtos e não conduziram ao equilíbrio e à homogeneização da matriz.

A determinação do fim da transformação da ferrita em austenita (Ac3) é mais complexa que Ac1, visto que se inicia a dissolução dos carbonetos. Foi constatada uma inflexão progressiva da curva de alongamento em função da temperatura, a partir de 950°C; e Ac3 foi determinada à título indicativo.

Quando a temperatura de austenitização aumenta (patamar de 1080°C) o ponto Ms diminui (temperaturas mais baixas). Numa temperatura de austenitização mais alta, mais carbono e cromo estarão em solução na matriz em função de uma maior dissolução de carbonetos, o que levará a uma transformação martensítica em temperaturas mais baixas.

À medida que o teor de carbono aumenta, o ponto Ms diminui. Com o teor de carbono mais alto, há maior quantidade de carbonetos residuais e também mais carbono na matriz. Com mais carbono na matriz, a transformação martensítica ocorre à temperaturas mais baixas. O átomo de carbono tem maior efeito em solução sólida na austenita que outros elementos como o cromo; ele é o principal elemento a exercer influência na temperatura Ms.<sup>[9]</sup>

A velocidade de resfriamento influi no Ms. Para o resfriamento mais lento (-2°C/s) a temperatura Ms é maior. Um estudo sobre a têmpera em linha dos inoxidáveis martensíticos com 13%Cr; 0,3%C e 13%Cr; 0,45%C,<sup>[6]</sup> mostrou que a velocidade crítica de têmpera à partir de 1060°C para evitar a reprecipitação de carbonetos nos contornos de grãos da austenita, e a degradação do comportamento à corrosão, é da ordem de 10°C/s a 20°C/s dentro do domínio crítico de 800°C a 500°C (quando ocorre a precipitação). Isto poderia explicar a distância dos pontos Ms entre as duas velocidades: na taxa de resfriamento de 2°C/s precipitaria mais carbonetos nas junções de austenita, empobreceria mais a matriz, o que facilitaria a transformação martensítica, que ocorreria a uma temperatura mais alta. Com base no estudo dilatométrico, decidiu-se aplicar nas amostras laminadas, uma velocidade de têmpera superior à 10°C/s para evitar a precipitação de carbonetos preferencialmente nos contornos de grão.

### **3.2 Estudo das Amostras Laminadas: Microestrutura, Fração Volumétrica de Carbonetos, Dureza e Tração**

Foram aplicados os seguintes ciclos térmicos nas amostras laminadas em fornos e estufas de laboratório:

#### **Recozimento:**

Patamar de 840°C, com taxa de resfriamento máxima de 8°C/h em atmosfera controlada (nitrogênio e hidrogênio):

#### **Austenitização:**

- 1) Temperatura de patamar de **1060°C** mantida durante 5min.
- 2) Temperatura de patamar de **1080°C** mantida durante 5min.

**Têmpera:**

Resfriamento à **15°C/s** até 25°C (meio: ar forçado). Mantido por 5min à 25°C.

**Têmpera subzero:**

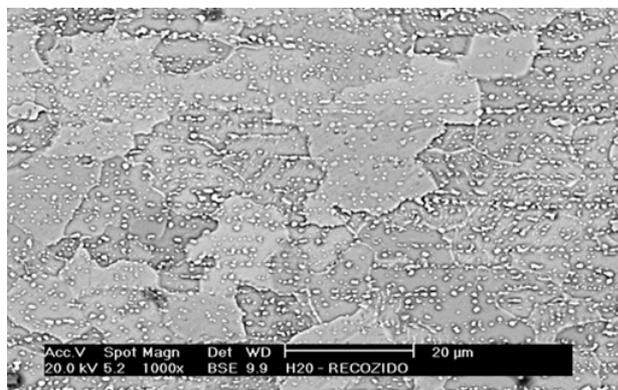
Resfriamento a **-180°C** (meio: nitrogênio líquido). Mantido 40min à -180°C. Retorno a 25°C durante 30min.

**Revenimento:**

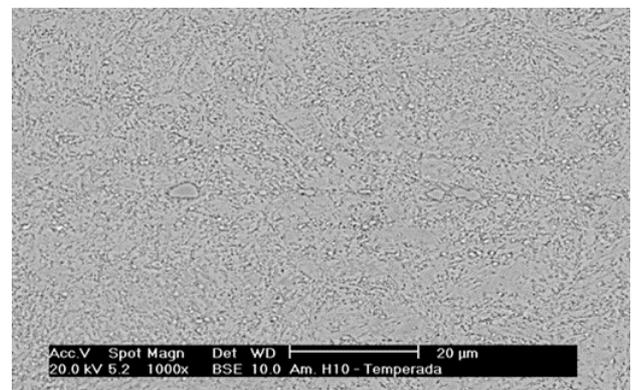
Mantido por 90min à **260°C**. Retorno à 25°C.

As fases apresentadas pelas ligas A, Y, B e C em cada etapa do tratamento térmico são as mesmas. O que muda de uma liga para a outra é o percentual de cada fase. Nesse estudo, cada fase é composta por um único constituinte.

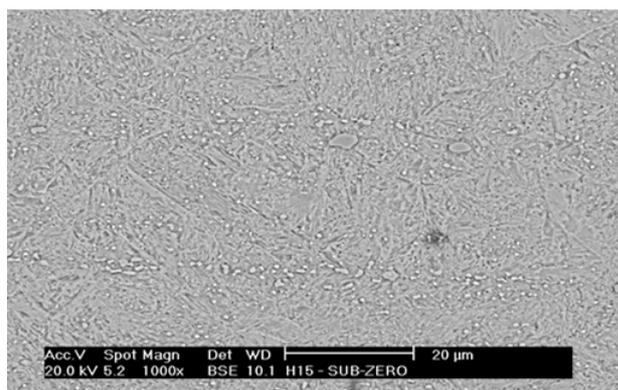
As amostras recozidas apresentaram como fases, uma matriz ferrítica e carbonetos. As amostras após têmpera, após subzero e revenimento apresentaram uma matriz martensítica, austenita retida e carbonetos. A Figura 1 retrata as fases registradas no MEV com referência de 20µm para a liga Y como exemplo. Reagente Vilella revelando os carbonetos (partículas claras) e a matriz.



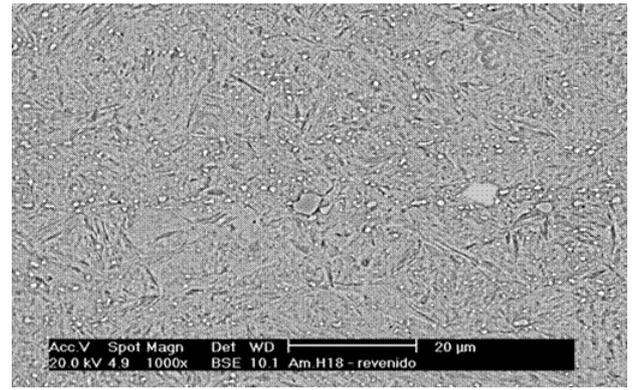
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 1** – Microestrutura da ligas Y com as fases presentes após cada etapa de tratamento térmico: (a) Recozimento, (b) Austenitização e Têmpera, (c) Têmpera Subzero, (d) Revenimento.

Na Figura 1a pode-se observar na amostra após recozimento, a matriz ferrítica e carbonetos em grande quantidade: os primários grandes, originários da solidificação inicial do material (entre 5µm e 10µm) e os secundários pequenos (da ordem de 1µm) em toda a extensão da amostra.

O material após austenitização e têmpera pode ser visualizado na Figura 1b. Durante a austenitização, com a elevação da temperatura acima de 1000°C, ocorre dissolução de parte dos carbonetos secundários;<sup>[10]</sup> os primários não são dissolvidos. O percentual de carbonetos após cada etapa de tratamento térmico para as 4 ligas é apresentado na Figura 2. Para as amostras austenitizadas a 1080°C, a dissolução de carbonetos foi maior que para aquelas a 1060°C. Os carbonetos dissolvidos durante a austenitização não voltam a precipitar se o tratamento de têmpera é acima de uma velocidade crítica, como mencionado no item 3.1.<sup>[6]</sup> A velocidade de resfriamento aplicada foi em torno de 15°C/s (acima da crítica).

Na Figura 1c pode-se observar a micrografia do material após têmpera subzero; na Figura 1d, a micrografia do material após revenimento. Nessas etapas ocorrem redução da austenita retida e alívio de tensões, portanto, as mudanças microestruturais são discretas, não sendo visíveis nas micrografias; os carbonetos não sofreram alterações. O percentual de carbonetos verificado após austenitização se manteve após têmpera subzero e revenimento.

Verifica-se também através da Figura 2, que a liga A (0,28%C) quase não apresenta carbonetos após os tratamentos térmicos; as ligas Y (0,43%C) e B (0,52%C) apresentam fração volumétrica de carbonetos similares, ocorre um patamar para essa faixa de carbono, e para a liga C (0,67%C) a fração volumétrica de carbonetos sobe. Ou seja, o percentual de carbonetos é crescente em função do teor de carbono, mas ocorre um patamar entre 0,43%C e 0,52%C.

Os carbonetos analisados em todas as ligas e etapas do tratamento térmico mostraram ser do tipo  $M_{23}C_6$  com aproximadamente 53% Cr, 36% Fe, 3% Mo e 8% C, apresentando formato tipicamente esferoidal.

A dureza das amostras recozidas foi determinada segundo a escala Rockwell-B, obtendo-se os seguintes valores médios para cada liga: 90,6 = Liga A; 91,2 = Y; 92,6 = B; 92,9 = C. Embora os valores sejam crescentes, a variação é mínima. Após têmpera, aplicou-se a escala Rockwell-C (HRC), cujos resultados são apresentados na Figura 3. Há diferença significativa entre os valores das amostras A e Y. Entre Y e B ocorre um patamar, e sobe um pouco para a amostra C. Ou seja, à partir de aproximadamente 0,4%C, os valores de dureza tendem a uma estabilização, como verificado para aços carbono, onde ocorre uma saturação na dureza HRC à partir de 0,65%C e para inoxidáveis martensíticos à partir de 0,60%C.<sup>[8]</sup>

O valor da dureza cai com o revenimento. As amostras austenitizadas a 1080°C apresentaram valores superiores às austenitizadas a 1060°C, devido ao retorno do carbono para a matriz com a maior dissolução de carbonetos.

A Figura 4 apresenta o limite de resistência em função do percentual de carbono para as amostras revenidas. Os valores são crescentes com o teor de carbono, e também tendem a uma estabilização acima de 0,4%C.

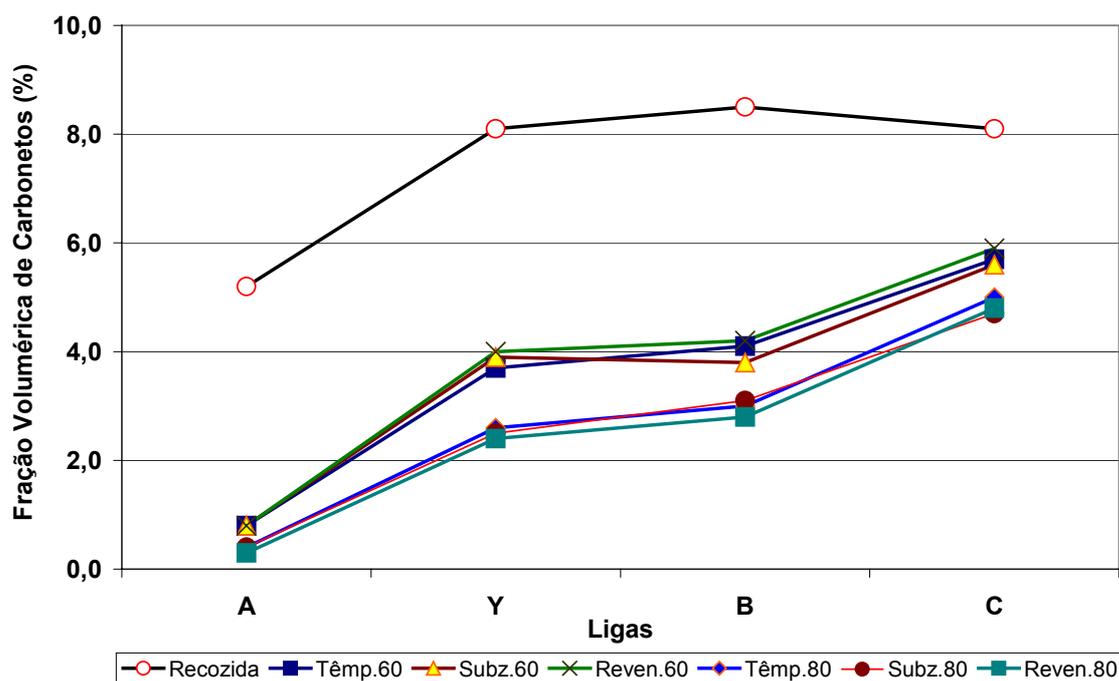


Figura 2 – Fração volumétrica de carbonetos após cada etapa de tratamento térmico para as ligas A, Y, B, C.

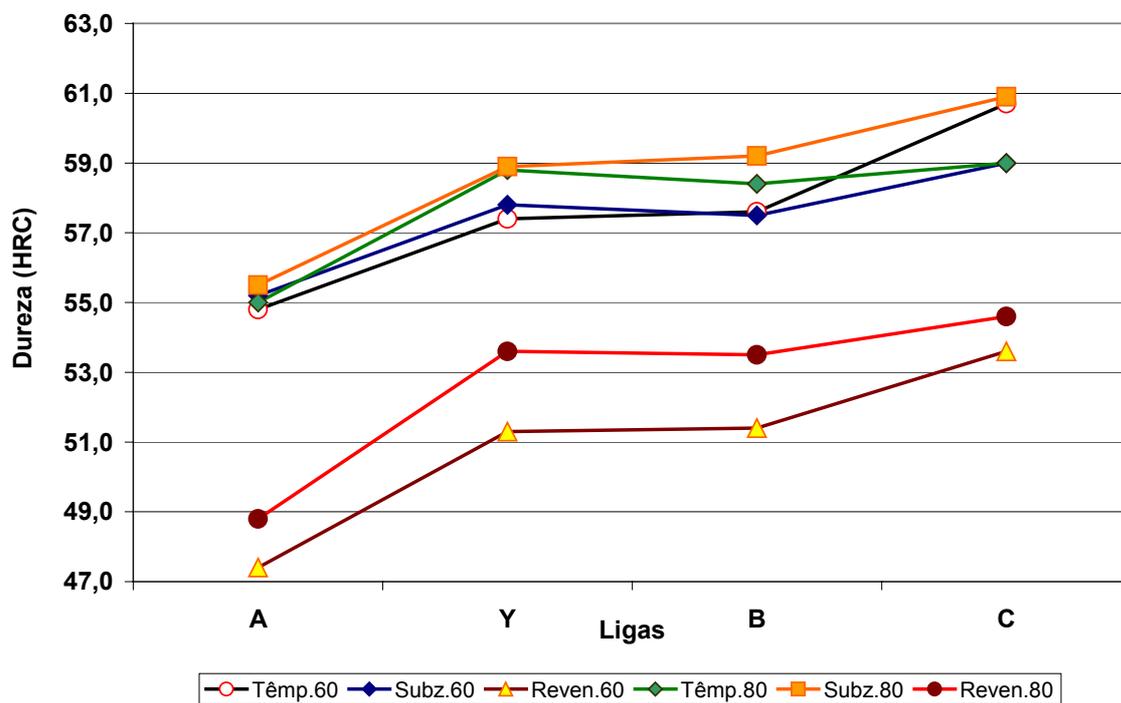


Figura 3 – Dureza HRC após cada etapa de tratamento térmico para ligas A, Y, B, C.

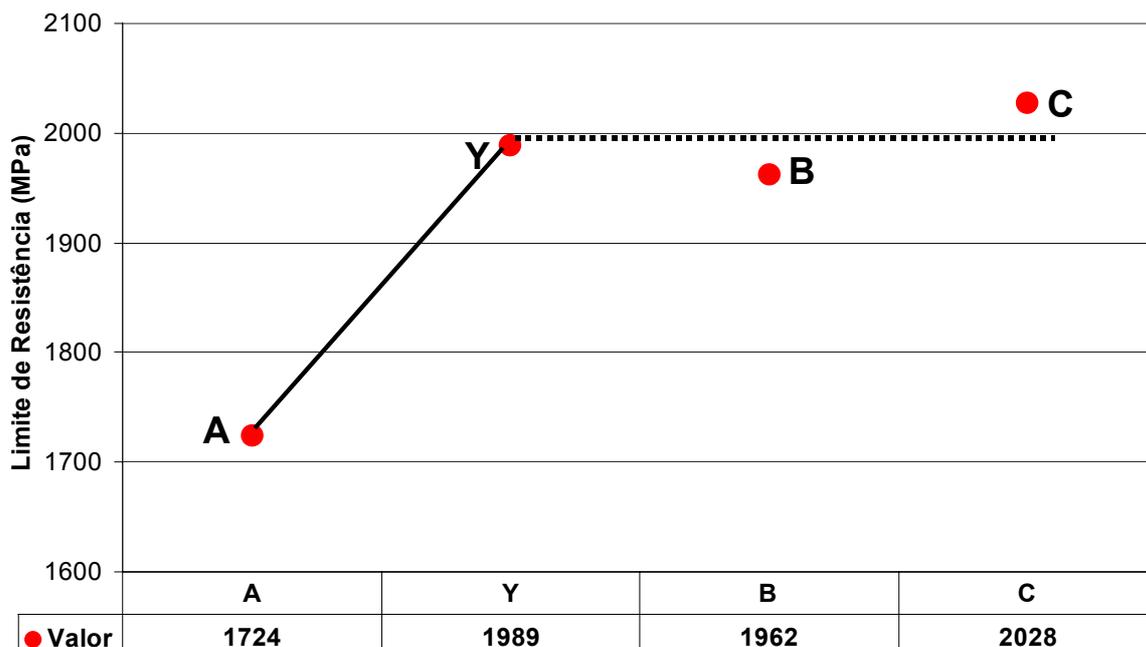


Figura 4 – Limite de resistência obtido por tração para as ligas A, Y, B e C revenidas.

#### 4 CONCLUSÃO

Para o aço inoxidável martensítico estudado, com diferentes teores de carbono, à medida que o teor de carbono aumenta, a temperatura  $A_{c1}$  diminui e o ponto  $M_s$  diminui.  $M_s$  também diminui com o aumento da temperatura de austenitização e para velocidades de têmpera maiores.

Durante austenitização ocorre dissolução de carbonetos secundários (para maior temperatura, maior dissolução), o que reduz o percentual de carbonetos presente no material recozido; esse percentual reduzido permanece até a etapa de revenimento. Após têmpera, a estrutura passa a ser constituída por martensita, austenita retida, carbonetos primários e secundários. Nas etapas de têmpera subzero e revenimento os carbonetos não sofrem alteração.

Os carbonetos encontrados nas estruturas analisadas após recozimento do aço são do tipo  $M_{23}C_6$ , compostos por aproximadamente 53%Cr, 36%Fe, 3%Mo e 8%C.

A fração volumétrica de carbonetos é crescente em função do percentual de carbono; no entanto, entre 0,43%C e 0,52%C permanece no mesmo patamar.

Os valores de dureza e do limite de resistência do material praticamente se estabilizam à partir de aproximadamente 0,4%C. Para valores entre 0,43%C e 0,52%C existe um patamar.

O teor de carbono aliado aos tratamentos térmicos tem reflexo significativo na microestrutura e principalmente nas propriedades do material.

#### REFERÊNCIAS

- 1 GALINARI, C.M., BÁLSAMO, P.S.S., VASCONCELOS, W.L. Estudo da Microestrutura de Aço Inoxidável Martensítico nos Processos de Siderurgia e Cutelaria. In: 60º CONGRESSO ANUAL DA ASSOC. BRAS. DE METALURGIA E MATERIAIS, 2005, Belo Horizonte, MG. Anais ABM, 2005. 1 CD.

- 2 ROMBEAUX, P. Traitements thermiques et resistance a la corrosion des aciers inox martensitiques pour la coutellerie. **Journée A.T.T.T.**, France, p. 01-09, 1992.
- 3 GARCIA, C., ALVAREZ, L.F. Less common aspects of solid-solid phase transformations in martensitic stainless steels. **Rev. Metal. Madrid**, p.417-422, 1997.
- 4 HAUSER, J.M. Étude du rôle des carbures, dilatométrie, analyse de phase, Centre de Recherches d'Ugine, CRU 024302, France, 2002.
- 5 GARCIA, C., CARUANA, G., ALVAREZ, L.F., Control of M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbides in 0,45C-13Cr martensitic stainless steel by means of three representative heat treatment parameters, **Materials Science and Engineering**, A241, p.211-215, 1998.
- 6 POMMIER, M., Tempre em ligne des inox martensitiques, Rapport CRU-UTC 89-0141, jul., 1989.
- 7 ASTM, Metals – Mechanical Testing, Metallography, Annual Book of ASTM Standards, v.03.01, Philadelphia, 1996.
- 8 PECKNER, D., BERNSTEIN, I. M., Handbook of Stainless Steels, 1977.
- 9 TANEIKE, M., SAWADA, K., ABE, F. Effect of carbon concentration on precipitation behavior of M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbides and MX carbonitrides in martensitic 9Cr steel during heat treatment, **Metallurgical Mat. Transactions**, v.35A, p.1255-1262, 2004.
- 10 CABALLERO, F.G.,CAPDEVILA, C., ALVAREZ, C., ANDRÉS, C. Thermoelectric power studies on a martensitic stainless steel. **Scripta Materialia**, v. 50, p. 1061-1066, 2004.