

Jorge Bertoldo Junior

*Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais - INPE*
jorgeengmecanico@yahoo.com.br

**Pedro Marcelo Alves
Ferreira Pinto**

Universidade de Taubaté - UNITAU
pmarcelo.aero@hotmail.com

Alam Jhones de Oliveira

Universidade de Taubaté - UNITAU
alamjhones@hotmail.com

Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi
Taubaté - SP
CEP 12060-440
Fone (12) 3625-4193

Editores responsáveis

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
luiz.nunes@unitau.com.br

Profa. Dra. Valesca Alves Correa
valesca.correa@unitau.com.br

DETERMINAÇÃO DA CURVA DE REVENIMENTO DO AÇO LIGA 52100

RESUMO

A liga 52100 foi desenvolvida para o setor automobilístico, para fabricação de aço para rolamento. A liga ao cromo apresenta elevada resistência mecânica. É utilizado como produto laminado, como também na fabricação de peças e dispositivos que fazem parte do processo de laminação como rolete guia de laminadores e rolos desempenadores de barras. Doze corpos de provas foram confeccionados para este estudo, eles foram submetidos aos processos de Normalização, têmpera e revenimento com as temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C com o intuito de analisar a influência do tratamento térmico de revenimento em relação às propriedades mecânicas de resistência a tração e dureza. Para determinação de suas propriedades mecânicas foram realizados ensaios de impacto e dureza em amostras normalizadas, temperadas e revenidas do aço SAE 52100 comercial.

Palavras-chave: Liga 52100; tratamento térmico; temperatura; dureza.

1 INTRODUÇÃO

Este estudo apresentará a influência da temperatura utilizada no processo de revenimento sobre a dureza da liga 52100 e, a partir destes resultados, será possível determinar os parâmetros de tratamento térmico ideais para a liga 52100 conforme as solicitações mecânicas para aços de rolamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão bibliográfica tem como proposta situar o leitor em relação aos principais conceitos relacionados a tecnologia dos aços.

2.1 Aço

O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0,008 e 2,11%. Distingue-se do ferro fundido, que também é uma liga de ferro e carbono, mas com teor de carbono entre 2,11% e 6,67%. Em metalurgia, é mais frequentemente usado no endurecimento de aço ao introduzir martensita, submetendo o aço a um arrefecimento brusco e obrigando-o a passar pelo seu ponto eutetoide, a temperatura onde a austenita se encontra instável. Em ligas de aço com outros metais, tais como o níquel e o manganês, que são ótimos para trabalhar com este tipo de utilização, a temperatura eutetoide torna-se mais baixa, mas as barreiras cinéticas à transformação de fase são iguais. Isto permite que o processo de têmpera comece a uma temperatura mais baixa, tornando o processo mais fácil. Até o arrefecimento de tais ligas ao ar (processo de normalização) obtém muitos dos efeitos desejados do processo de têmpera e só depois disso tudo que o aço pode ser então comercializado (CHIAVERINI, 2008). A Figura 1 representa o digrama ferro carbono.

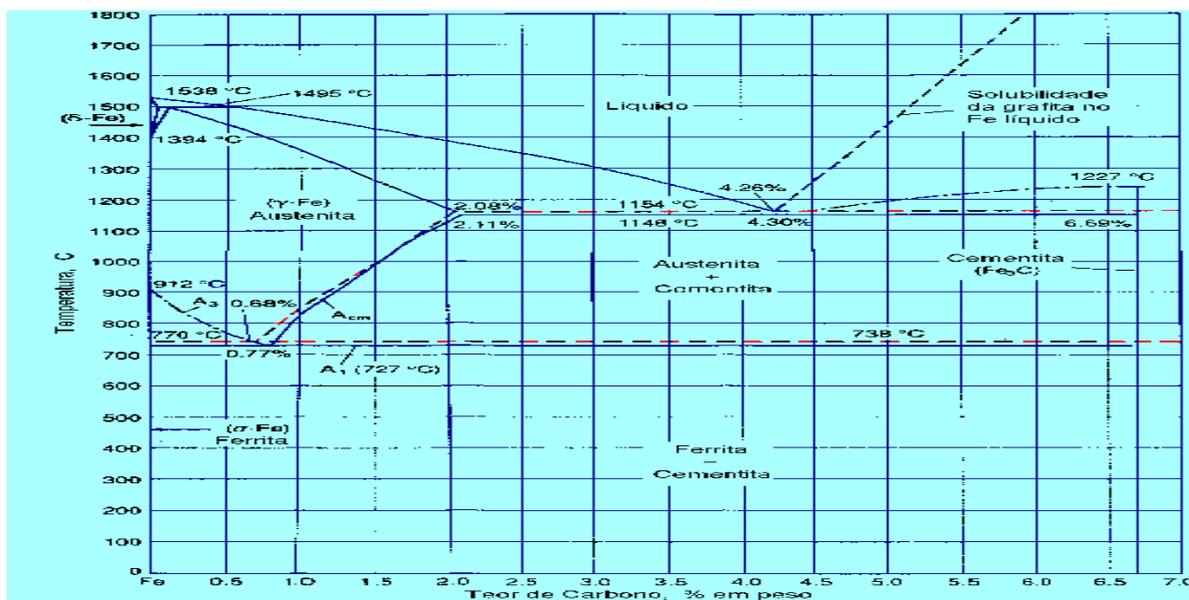


Figura 1: Diagrama ferro carbono.

Fonte: (CHIAVERINI, 2008).

O digrama ferro-carbono possui alguns pontos importantes de seus microconstituintes (CHIAVERINI, 2008):

- Ferro comercialmente puro e seu micro constituinte é a ferrita.
- Aços hipoeutetoides, com teor de carbono de até 0,77%, e seus microconstituintes são ferrita e perlita.
- Aços eutetoides, com teor de carbono de 0,77%, e seu microconstituinte é a perlita.
- Aços hipereutetoides, com teor de carbono de 0,77 até 2,11%, e seus microconstituintes são perlita e cementita.

Estes microconstituintes são representados assim no diagrama ferro – carbono (CHIAVERINI, 2008):

- Ferrita – Fe α
- Cementita – Fe₃C
- Perlita – Fe α + Fe₃C

Segundo Chiaverini (2008) no diagrama ferro carbono ilustrado pela figura 1, as fases das ligas ferro-carbono que representam os materiais de maior utilização prática. Isto se deve ao fato de que estas ligas podem apresentar uma grande variação nas suas propriedades pela simples variação na quantidade de carbono e ainda possibilitam que se tenha uma gama maior de propriedades se considerarmos a possibilidade de deformação plástica e os tratamentos térmicos. A base para que este material tenha estas características está principalmente atrelado ao fato de que o ferro puro apresenta transformação alotrópica e que o carbono forma uma solução sólida intersticial com o ferro. Isto conduz a uma série de possibilidades de transformações, cada uma com suas microestruturas típicas, resultando na grande variação das propriedades.

As transformações em uma liga ferro-carbono são influenciadas basicamente pela temperatura e pelo teor de carbono. Se considerarmos apenas estes dois fatores poderá montar um mapa das transformações que irão ocorrer, o qual será chamado de diagrama de equilíbrio. Nesta representação podemos ver as fases que estarão presentes para cada temperatura e composição e também os pontos que são fundamentais para a compreensão das transformações. Ha algumas considerações a respeito do diagrama (CHIAVERINI 2008).

Em primeiro lugar deve ser observado que o diagrama vai somente até 6,69% de carbono. Isto se deve ao fato de que as ligas acima deste teor não têm qualquer importância comercial. Em segundo lugar deve ficar claro que as ligas comerciais não são constituídas apenas por ferro e carbono, mas podem ter em sua composição outros elementos de liga além de pequenas quantidades de impurezas que são inerentes ao processo de obtenção do material. Assim o diagrama não representa fielmente o que sucede na prática, mas como pequenas quantidades de outros elementos não produzem grandes alterações, podemos utilizá-lo como base para o nosso estudo (CHIAVERINI 2008).

Observando-se a Figura 1, nota-se que esta apresenta vários pontos que merecem ser destacados. O primeiro deles é o que corresponde a uma composição de 2,11% de carbono a 1148°C. Este ponto representa uma fronteira entre as ligas ferro-carbono que são caracterizadas como aços e as ligas que são caracterizadas como ferro fundido. Assim, aço é uma liga com menos de 2,11% de carbono e ferro fundido é uma liga com mais de 2,11% de carbono. A escolha deste ponto deve-se ao fato de que, quando resfriamos um aço desde o estado líquido, este sempre passará por uma faixa de temperaturas em que a sua microestrutura será composta de uma única fase

chamada austenita, o que não acontece para os ferros fundidos que possuem teores de carbono acima deste valor (SANTOS, 2006).

Segundo Santos (2006), os metais nos estados sólidos assumem uma estrutura cristalina, que é caracterizada por um arranjo regular de átomos no espaço, formado a partir de uma unidade repetitiva denominada célula unitária. A célula unitária é, então, o menor arranjo de átomos no espaço capaz de representar a estrutura de um sólido cristalino.

O diagrama ferro-carbono utilizado na prática na realidade é um falso diagrama de equilíbrio, isto é, ele representa o equilíbrio metaestável entre ferro e um carboneto de ferro chamado cementita que tem fórmula estequiométrica Fe_3C . O fato é que a forma mais estável da liga ferro carbono seria ferro e grafita, mas como a grafita pode levar até mesmo anos para se formar, o diagrama estável não possui aplicação prática. Em um diagrama de equilíbrio as fases são sempre representadas por letras gregas, mas no caso das ligas ferro carbono estas fases além de serem identificadas por letras gregas também receberam um nome. Desta forma teremos as fases denominadas ferrita, austenita e cementita, que podem ou não estarem presentes na microestrutura do material, dependendo do teor de carbono e da temperatura (SANTOS, 2006).

A austenita, também chamada fase gama, é uma fase derivada do ferro gama que como se sabe é formado por uma estrutura cúbica de faces centradas (CFC), ilustrado na Figura 2 (SANTOS, 2006).

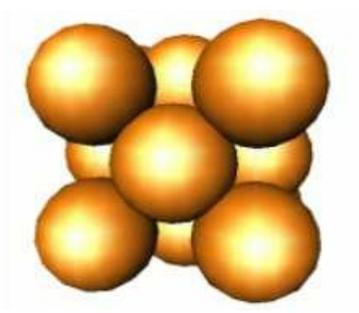


Figura 2: Estrutura cristalina cúbica de faces centradas.

Fonte: (SANTOS, 2006).

Quando se combina o ferro com o carbono, forma-se uma solução sólida intersticial em que é mantida a estrutura cristalina original do ferro (SANTOS, 2006).

Em temperaturas inferiores, o fato de o ferro gama passar para ferro alfa produz o aparecimento de uma nova fase chamada fase α ou ferrita. A ferrita também é uma solução sólida intersticial de ferro e carbono e, a exemplo da fase gama, é mantida a estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) do ferro, conforme ilustrado na Figura 3 (SANTOS, 2006).

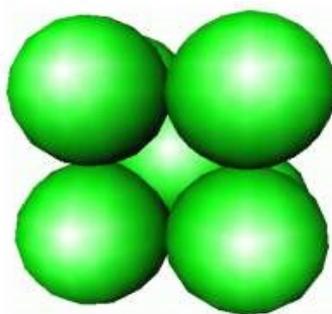


Figura 3: Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado.

Fonte: (SANTOS, 2006).

Devido ao fato de que as duas fases citadas possuem diferenças em sua estrutura cristalina, existe também uma grande diferença de solubilidade do carbono entre elas. Os interstícios da estrutura CFC são maiores do que os interstícios da estrutura CCC. Isto conduz a uma solubilidade do carbono que pode chegar a 2,11% (aproximadamente 9% em átomos) na temperatura de 1148°C para a austenita e somente 0,025 % (aproximadamente 0,1% em átomos) a 727° C para a ferrita (SANTOS, 2006).

2.1.1 Aço hipoeutetoide teor de carbono de até 0,77%C

Os microconstituintes de um aço hipoeutetoide são a ferrita e a perlita, aonde a perlita é formada de ferrita + cementita, em uma fotomicrografia com ampliação de 200 vezes, a área branca é considerada ferrita, e a área escura é considerada a perlita, conforme ilustra a Figura 4 (CHIAVERINI 2008).

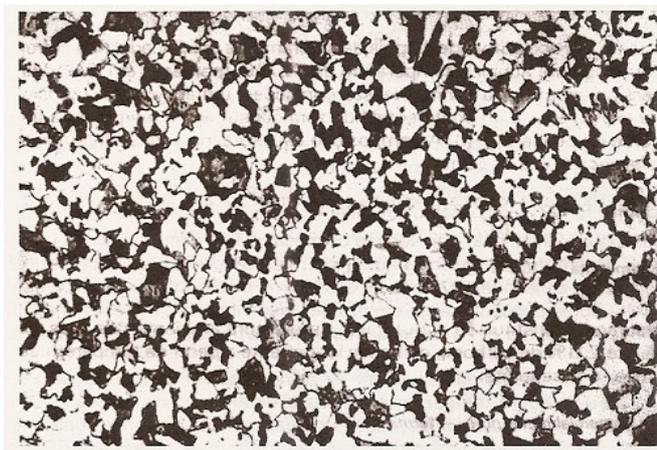


Figura 4: Aspecto micrográfico de um aço hipoeutetoide.

Fonte: (CHIAVERINI, 2008).

2.1.2 Aço eutetoide teor de carbono de até 0,77%C

O microconstituente de um aço eutetoide é a perlita, que é formada de ferrita + cementita cuja os símbolos são $Fe\alpha$ e Fe_3C respectivamente, em uma fotomicrografia com ampliação 1000 vezes, as linhas escuras, são de cementitas, e as linhas claras são de ferrita, ou seja a perlita é considerada área escura, conforme é mostrado a Figura 5 (CHIAVERINI 2008).



Figura 5: Aspecto micrográfico de um aço eutetoide.
Fonte: (CHIAVERINI, 2008).

2.1.3 Aço hipereutetoide teor de carbono de até 0,77%C até 2,11%C

Os microconstituintes de um aço hipereutetoide são a cementita e a perlita, onde a perlita é formada de ferrita + cementita. A cementita está disposta em torno dos grãos de perlita, formando uma rede, conforme é mostrado na figura 6 (CHIAVERINI, 2008).



Figura 6: Aspecto micrográfico de um aço hipereutetoide esfriado lentamente.
Fonte: (CHIAVERINI, 2008).

2.2 Considerações Iniciais

O aço liga 52100 passa pelos seguintes tratamentos térmicos: têmpera e revenimento, tratamento térmico que é o foco deste trabalho.

O revenimento é o tratamento térmico que normalmente sucede a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta, além de aliviar ou remover tensões internas, corrige a excessiva dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque (CHIAVERINI, 2006).

2.3 Tratamento Térmico

Há muito tempo, o artífice aprendeu que os materiais eram alterados por aquecimento e pela maneira com que eram resfriados. Eles estabeleceram nomes para os vários processos do tratamento térmico, embora não conhecessem exatamente o que ocorria na intimidade do material. Como consequência destes fatos, poderemos melhor controlar as propriedades finais dos materiais. Um conhecimento sobre as transformações da estrutura interna tem também conduzido a novos processos que ampliam a capacidade de muitos materiais frente a aplicações de engenharia (VAN VLACK, 1984).

2.3.1 Normalização

A normalização tem como objetivo obter um produto uniforme é desejável na maioria dos casos, uma maior uniformidade é conseguida algumas vezes através de tratamentos térmicos apropriados. Para esses processos também se utilizam os nomes comerciais que indicam homogeneização e saturação (VAN VLACK, 1984).

2.3.2 Têmpera

Segundo COSTA E SILVA e MEI (2006), uma das características mais importantes dos aços e de desenvolver ótimas combinações como resistência e tenacidade a estrutura que permite tais combinações é a estrutura martensítica revenida.

A têmpera consiste em resfriar o aço rapidamente, após a austenitização, para evitar as transformações bainíticas e perlíticas, obtendo somente a estrutura metaestável martensítica (COSTA E SILVA e MEI, 2006).

2.3.3 Revenimento

A estrutura martensita a após a têmpera, fica com estrutura dura e frágil. Peças que são deixadas nessas condições tem grande risco de trincar. Com baixa tenacidade tornam-se estas estruturas sem emprego pratico. Para se atingir os valores adequados de resistência mecânica e tenacidade, logo após a têmpera deve-se fazer o processo de revenimento, que consiste em aquecer o material a uma determinada temperatura abaixo daquela de austenitização, mantendo o aço nesta temperatura num determinado tempo suficiente para a equalização da temperatura e obtenção das propriedades desejadas. As mudanças nas propriedades dos aços dependem do tempo e da temperatura de revenimento. De uma forma geral os primeiros minutos de revenimento têm uma queda de dureza significativa, porem a partir de duas horas de revenimento a queda de dureza não é acentuada. Assim para a continuidade da queda da dureza seria correto aumentar a temperatura, do que deixa-lo por um período longo em temperatura inferior (COSTA E SILVA e MEI, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado o processo de normalização do corpo de prova no aço 52100, utilizando – se um forno tipo Mufla, mantido internamente na temperatura de normalização de 920°C, conforme a tabela apresentada por (AÇOS VILLARES SIDENOR, 2010).

3.1 Aquecimento na Normalização

O forno foi ligado e esperou – se que o mesmo atingisse a temperatura de 920°C. Após o forno atingir a temperatura especificada, foram inseridas dentro do forno os corpos de prova de 2 em 2, totalizando 12 corpos de prova.

A temperatura caiu para 820°C, em função da abertura da porta do forno. Assim que a temperatura do forno retornou ao patamar de 920°C, a mesma foi mantida por 20 minutos.

Segundo a literatura de CHIAVERINI (2006) está escrito que, o tempo de permanência necessário para uma completa normalização é 1 minuto por milímetro, ou seja, a permanência de um o corpo de prova de 18 milímetros foi arredondada para 20 minutos.

Após estes 20 minutos, os corpos de prova foram retirados do forno e resfriado ao ar.

3.2 Resfriamento na Normalização

Em 30 minutos o corpo de prova atingiu o patamar de temperatura de 68°C, a uma taxa de resfriamento de 28,4°C/m, em 60 minutos o corpo de prova atingiu o patamar de temperatura de 35°C, a uma taxa de resfriamento de 14,7°C/m, em 90 minutos atingiu o patamar de temperatura de 29°C e em 100 minutos atingiu o patamar de temperatura de 25°C.

Foi realizado o tratamento térmico de tempera. O forno tipo Mufla foi programado para atingir o patamar de temperatura de 850°C, temperatura de austenitização.

3.3 Aquecimento da Têmpera

O forno foi ligado e esperou–se que o mesmo atingisse a temperatura de 850°C. Após o forno atingir a temperatura especificada, foram inseridas dentro do forno os corpos de prova de 2 em 2, totalizando 12 corpos de prova. No momento da abertura do forno a temperatura caiu para 750°C e assim que a temperatura atingiu novamente o patamar de 850°C, o mesmo foi mantido por 20 minutos, conforme escrito na literatura de Chiaverini (2006).

3.4 Resfriamento da Têmpera

Após os 20 minutos, os corpos de prova foram retirados imediatamente, e resfriados em óleo.

A escolha do resfriamento em óleo, e não em água, sustenta – se no fato da alta porcentagem de carbono, o que pode ocasionar o surgimento de trincas. O resfriamento em óleo evita o aparecimento de trincas, uma vez que o mesmo ocorre com taxa de resfriamento menor quando comparado com a água.

Durante o processo de resfriamento das amostras foram observados os seguintes patamares de temperatura em função do tempo decorrido desde o início do processo de resfriamento:

- Em 2 minutos de resfriamento o corpo de prova estava com a temperatura de 180°C.
- Em 4 minutos de resfriamento o corpo de prova estava com a temperatura de 50°C.
- Em 6 minutos de resfriamento o corpo de prova estava com a temperatura de 45°C.

- Em 8 minutos de resfriamento o corpo de prova estava com a temperatura de 38°C.
- Em 10 minutos de resfriamento o corpo de prova estava com a temperatura de 33°C.
- Em 12 minutos de resfriamento o corpo de prova estava com a temperatura de 30°C.
- Em 13 minutos de resfriamento o corpo de prova estava com a temperatura de 25°C.

3.5 Revenimento

Quatro corpos de prova foram revenidos a 200°C, quatro corpos de prova foram revenidos a 400°C e quatro corpos de prova foram revenidos a 600°C.

Quatro corpos de prova foram inseridos no forno tipo Mufla em temperatura ambiente, e a cada 10 minutos incrementos de temperatura de 20°C foram realizados, até que os patamares de temperatura de interesse para este estudo fossem atingidos. Os mesmos foram mantidos por 120 minutos para garantir a homogeneização do corpo de prova. Após este procedimento os patamares de temperatura caíram 20°C a cada 10 minutos, até atingir 100°C, instante no qual foram retirados os corpos de prova do forno, e resfriados em temperatura ambiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de tração e dureza (Tabela 1) foram realizados após o tratamento térmico com a finalidade de atingir o objetivo deste estudo, observar a relação entre a dureza da liga de aço e a temperatura de revenimento.

Os doze corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração utilizando o equipamento Kratos, máquinas especialmente desenvolvidas para ensaios dinâmicos, totalmente controlados via *software*, permitindo a programação da frequência e amplitude dos ensaios, cálculos automáticos. Os doze corpos de prova foram submetidos a ensaios de dureza, cortando – se amostras de 10 cm de largura de cada um dos corpos de prova, das quais foram obtidos os valores relativos a dureza da liga na escala HB.

Tabela 1: Resultados de dureza e tração do aço liga 52100.

	REVENIMENTO 200°C		REVENIMENTO 400°C		REVENIMENTO 600°C	
	TRAÇÃO(Kgf/mm ²)	DUREZA(HB)	TRAÇÃO(Kgf/mm ²)	DUREZA(HB)	TRAÇÃO(Kgf/mm ²)	DUREZA(HB)
AMOSTRA 1	167,1	464	145,4	404	108,6	302
AMOSTRA 2	162,4	451	145,4	404	115,6	321
AMOSTRA 3	165,1	464	141,4	393	110,2	306
AMOSTRA 4	164,3	455	149,4	415	111,4	306

A figura 7 e a figura 8 apresentam a curva que relaciona a dureza média e a resistência à ruptura do aço liga 52100 em função do patamar de temperatura utilizado no tratamento térmico de revenimento.

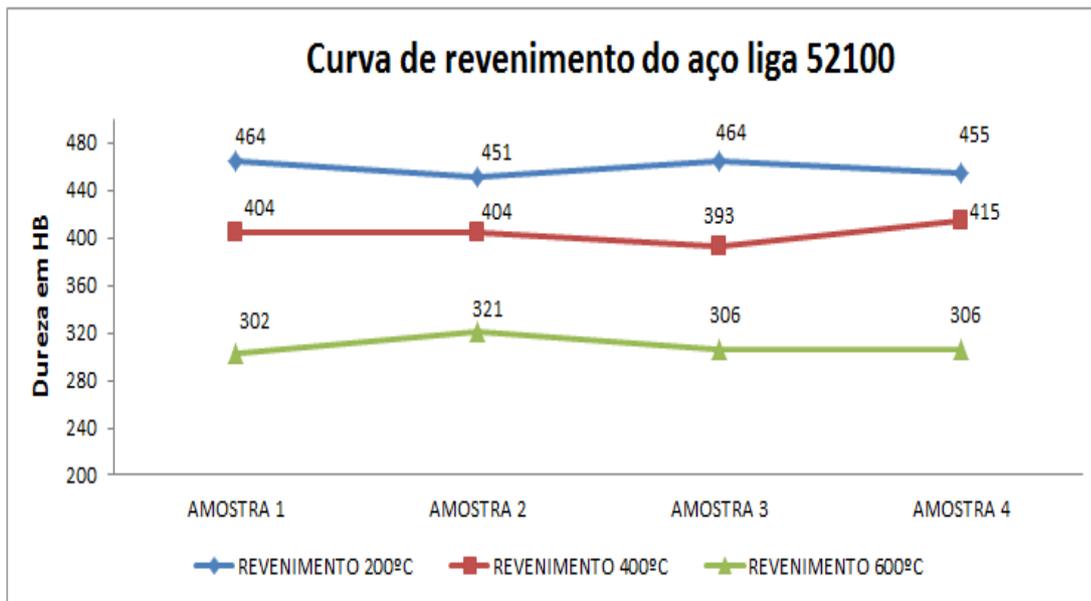


Figura 7: Relação entre a dureza da Liga e o patamar de temperatura utilizado no tratamento térmico da liga 52100.

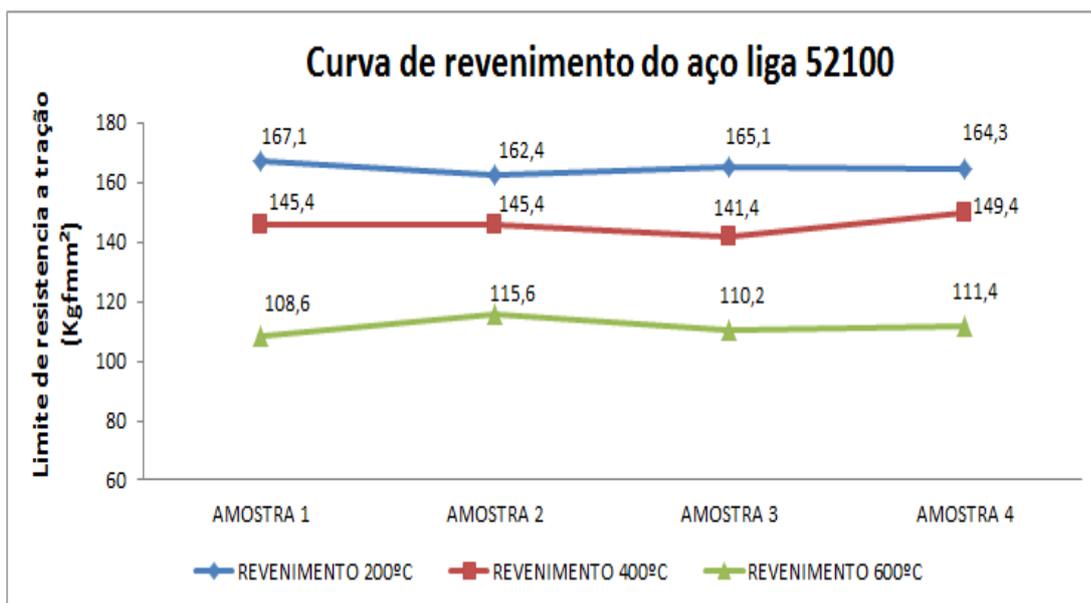


Figura 8: Relação entre o limite de resistência da Liga e o patamar de temperatura utilizado no tratamento térmico da liga 52100.

Observando-se os resultados plotados nos gráficos em função dos patamares de temperatura percebe-se que quando ocorre um aumento do patamar de temperatura do revenimento, o limite de resistência a tração e a dureza diminuem

5 CONCLUSÃO

Este estudo contribuiu para a evolução do conhecimento a respeito da influência dos patamares de temperatura utilizados no tratamento térmico de revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço liga 52100, dureza e resistência à tração. A partir do mesmo sabemos agora que os aumentos dos patamares de temperatura diminuem os valores da dureza final desta liga de aço, assim como diminui a suas resistências a tração.

A partir destes resultados pode-se determinar os patamares para as temperaturas de revenimento para que determinados valores de dureza e resistência a tração especificados sejam atingidos.

REFERÊNCIAS

- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. ampliada e revisada. Associação Brasileira de metalúrgicos e materiais, São Paulo, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. Associação Brasileira de metalúrgicos e materiais, São Paulo, 2006.
- COSTA E SILVA, A. L. V. e MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**, 1º Ed., São Paulo, 2006.
- SANTOS, M. M., **Metalurgia da Soldagem**. São Paulo, 2006.
- PARÂMETROS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS AÇOS VILLARES SIDENOR, 2010.
- SANTOS, M. M. **Metalurgia da Soldagem**. São Paulo (2006)
- VLACK, V. e HALL, L. **Princípios de tecnologia dos materiais**. Elsevier, Rio de Janeiro, 1984.