

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ELOÍSA HELENA RIBAS

Levantamento da curva de revenimento do aço SAE 9260

São Carlos
2019

ELOÍSA HELENA RIBAS

Levantamento da curva de revenimento do aço SAE 9260

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Benedito Marcomini

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU
ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA,
DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes
da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R482 Ribas, Eloisa Helena
1 Levantamento da curva de revenimento do aço SAE
9260 / Eloisa Helena Ribas; orientador José Benedito
Marcomini. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Aço SAE 9260. 2. Revenimento. 3. Têmpera.
4. Austenitização. I. Título.

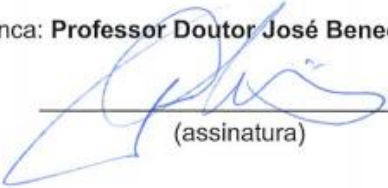
Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Eloísa Helena Ribas
Título do TCC: Levantamento da curva de revenimento do aço SAE 9260
Data de defesa: 19/11/2019

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor José Benedito Marcomini (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	
Professor Doutor Haroldo Cavalcanti Pinto	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	
Pesquisador Joseane Moreira Giarola	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	

Presidente da Banca: **Professor Doutor José Benedito Marcomini**


(assinatura)

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais por toda luta,
carinho, compreensão e força.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Geraldo e Roseli por todo apoio, carinho e compreensão.

À minha irmã Jaqueline por ser uma inspiração pra mim e pela ajuda nos momentos difíceis.

Agradeço aos amigos que eu fiz durante esses anos cursando a universidade. Obrigada por todos os momentos que passamos juntos, pelas festas, pelas conversas, pelo apoio nas horas difíceis.

Ao meu orientador neste trabalho, Professor Dr. José Benedito Marcomini, pela ajuda, orientação e paciência.

Ao técnico Denilson Kleber Vila e ao Dr. Alberto Cury Nassour pela ajuda nos procedimentos experimentais deste trabalho.

RESUMO

RIBAS, E. H. **Levantamento da curva de revenimento do aço SAE 9260**. 2019. 73f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O aço é utilizado em uma vasta gama de aplicações: construções, automóveis, máquinas, facas. Cada aplicação em que o aço é empregado exige que o material apresente determinadas propriedades, que podem ser controladas pela composição do material e pelo tratamento térmico a que este é submetido. A proposta do presente trabalho foi a elaboração da curva de revenimento do aço SAE 9260. Para isso, amostras do aço foram austenitizadas nas temperaturas 850°C e 950°C e temperadas à óleo. Em seguida, elas foram revenidas nas temperaturas 250°C, 350°C e 450°C. Para construir a curva realizou-se ensaios de dureza nas amostras, além disso, foi feita uma análise microestrutural. No ensaio de dureza observou-se grande diferença de dureza entre a amostra no estado de fornecimento (bruto de laminação) e as tratadas termicamente. No material apenas temperado verifica-se dureza superior ao temperado e revenido. As amostras austenitizadas em 950°C apresentaram maior dureza após revenimento. A amostra austenitizada em 850°C e revenida em 350°C apresenta um aumento de dureza (54HRC), em relação a que foi revenida em 250°C (52HRC).

Palavras-chave: Aço SAE 9260. Revenimento. Têmpera. Austenitização

ABSTRACT

RIBAS, E. H. **Tempering curves for SAE 9260 Steel**. 2019. 198 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Steel is used in a wide range of applications: buildings, automobiles, machines, knives. For each application it is necessary that the steel used has certain properties, which can be controlled by the composition of the material and the heat treatment applied. The purpose of the present paper was the elaboration of the tempering curve of SAE 9260 steel. For this, samples of the steel were austenitized at temperatures 850 ° C and 950 ° C and cooled with oil. They were then tempered at temperatures of 250 ° C, 350 ° C and 450 ° C. To construct the curve, hardness tests were performed on the samples, and a microstructural analysis was performed. In the hardness test a great hardness difference was observed between the sample in the state of supply and the heat treated ones. In hardened material only, hardness is higher than the ones in which was applied quenching and tempering. The austenitized samples at 950 ° C showed higher hardness after tempering. The austenitized sample at 850 ° C and tempered at 350 ° C shows an increase in hardness (54HRC), compared to 250 ° C (52HRC).

Keywords: SAE 9260 steel. Quenching. Tempering. Austenitization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Fases Fe-C.....	23
Figura 2 – Diagrama de equilíbrio bifásico genérico.....	24
Figura 3 – Micrografia de um aço hipoeutetóide esfriado lentamente.....	25
Figura 4 – Micrografia de um aço eutetóide esfriado lentamente.....	26
Figura 5 – Micrografia de um aço hipereutetóide esfriado lentamente.....	26
Figura 6 - Transformação da Austenita em outros microconstituintes.....	27
Figura 7 - Diagrama TTT de um aço eutetóide.....	28
Figura 8 - Diagrama TTT aço hipoeutetóide.....	29
Figura 9 - Diagrama TTT aço hipereutetóide.....	29
Figura 10 - Estágios do resfriamento em meio líquido.....	32
Figura 11 - Gráfico do processo de têmpera e revenimento.....	34
Figura 12 - Curva CTT do aço SAE 9260.....	35
Figura 13 - Curvas de revenimento obtidas para o aço SAE 9260.....	38
Figura 14 - Inclusões presentes na amostra no estado de fornecimento. Aumento 100x. Sem ataque.....	41
Figura 15 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 no estado de fornecimento (bruto laminado). Ataque: nital 2%.a) com aumento de 100x apresentando estrutura constituída de ferrita e perlita, b) com aumento de 500x c) com aumento de 1000x. Nota-se o detalhe da ferrita próeutetóide nos contornos de grãos de perlita (círculo branco).....	42
Figura 16 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 58HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 64HRC, ambas sem revenimento. Ataque Nital 2%. Estrutura predominantemente martensítica.....	44
Figura 17 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 52HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 56HRC, ambas com revenimento a 250°C. Ataque Nital 2%. Estrutura predominantemente martensítica, com alguns carbonetos precipitados.....	45
Figura 18 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 54HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 53HRC, ambas com revenimento a 350°C. Ataque Nital 2%. Nota-se uma quantidade maior de carbonetos.....	46
Figura 19 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 43HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 49HRC, ambas com revenimento a 450°C. Ataque Nital 2%. Nota-se uma	

quantidade	maior	de
carbonetos.....		47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre as amostras e o tratamento térmico aplicado.....	36
Tabela 2 – Média das durezas medidas nas amostras.....	38
Tabela 3 – Análise de inclusões conforme ASTM E45.....	41

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Objetivo.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Diagrama de Equilíbrio.....	23
2.1.1 Regra da Alavanca.....	24
2.1.2 Classificação dos Aços	25
2.1.3 Efeito dos Elementos de Liga.....	26
2.2 Diagramas TTT.....	27
2.2.1 Fatores que Afetam o Diagrama TTT.....	30
2.3 Constituintes.....	30
2.4 Tratamentos Térmicos	31
2.4.1 Temperabilidade.....	31
2.4.1 Têmpera	32
2.4.2.1 Mecanismos de Resfriamento.....	33
2.4.2.2 Tensões na Têmpera	33
2.4.3 Revenimento.....	33
2.5 Aço SAE 9260.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Tratamentos Térmicos: Têmpera e Revenimento.....	36
3.2 Ensaio de Dureza.....	37
3.3 Análise de Inclusões e Microestrutural.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Ensaio de Dureza.....	38
4.2 Análise de Inclusões e Microestrutural	40
5 CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Aço é um material amplamente utilizado tanto na construção civil quanto na mecânica. Ele pode ser encontrado em estruturas de prédios, torres de energia, implementos agrícolas e outras aplicações.

A escolha de um aço para determinada aplicação depende de suas propriedades. De maneira geral, os aços são resistentes à tração, compressão e flexão. Algumas propriedades dessa materiais podem ser melhoradas com a adição de elementos de liga e também por meio de tratamentos térmicos e químicos.

Os tratamentos térmicos são conjuntos de operações de aquecimento e resfriamento a que os aços são submetidos. Os principais objetivos desses tratamentos são: aumentar ou diminuir a dureza, aumentar resistência mecânica, melhorar resistência ao desgaste, remover tensões internas.

Os aços para construção mecânica, de médio a alto teor de carbono, são utilizados no estado temperado e revenido. O aço SAE 9260 é um aço ao Si, com teores aproximados, em peso, de C:0.60 Cr:0.35 Si:1.80 Mn: 0.80. Esse aço pode ser utilizado em molas helicoidais, barras de torção, molas de arco e molas de válvula para motores de combustão interna, facas para corte de cana em máquinas, espadas Katana, facas para laminação e outras que exigem resistência ao desgaste, propriedade que está intimamente ligada à alta dureza superficial.

Dependendo da aplicação, existe uma combinação de dureza e tenacidade ótimas. O único tratamento no qual se pode ter um controle ótimo da dureza, por meio da obtenção da microestrutura ideal é a têmpera, seguida de revenimento. A curva de revenimento é uma propriedade de aços ferramentas e microligados, além de ser uma das maneiras de se prever o comportamento do aço frente aos tratamentos de têmpera e revenimento.

Pela vasta gama de aplicação do aço SAE 9260 é importante que a curva de revenimento desse aço seja determinada.

1.1 Objetivo

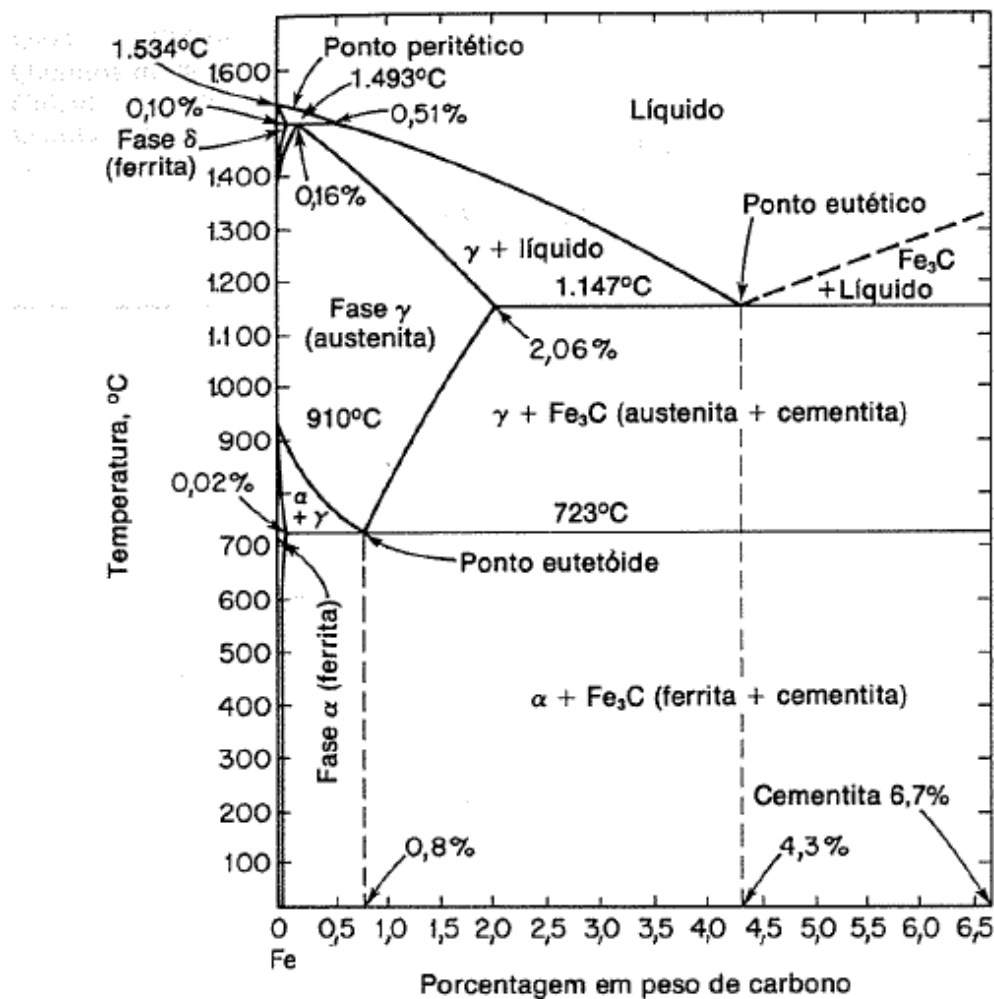
O presente trabalho tem como objetivo determinar a curva de revenimento do Aço SAE 9260, analisando os valores de dureza em relação às temperaturas de austenitização e de revenimento e correlacionando-os com as respectivas microestruturas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Diagrama de Equilíbrio

Para estudar e compreender o comportamento das ligas metálicas durante o resfriamento nas condições de equilíbrio a partir do estado líquido são utilizados os diagramas de equilíbrio. O diagrama de equilíbrio ferro-carbono apresenta apenas concentrações menores que 6,67% de C, visto que concentrações maiores que estas são pouco conhecidas e de pouco interesse comercial. É importante ressaltar que a cementita não é de fato uma fase de equilíbrio, porém após ser formada ela é muito estável e pode ser tratada como uma fase de equilíbrio para aplicações práticas. O diagrama de equilíbrio Fe-C está representado na Figura 1 abaixo.

Figura 1: Diagrama de Fases Fe-C



Fonte: [REED-HILL,1982]

Em torno de 1148°C é encontrado o ponto que representa uma liga eutética, com 4,3%C que é a de mais baixo ponto de fusão ou solidificação. Da mesma forma, podemos observar o ponto eutetóide a 727°C que corresponde a ligas com 0,77%C. [CHIAVERINI, 1988]

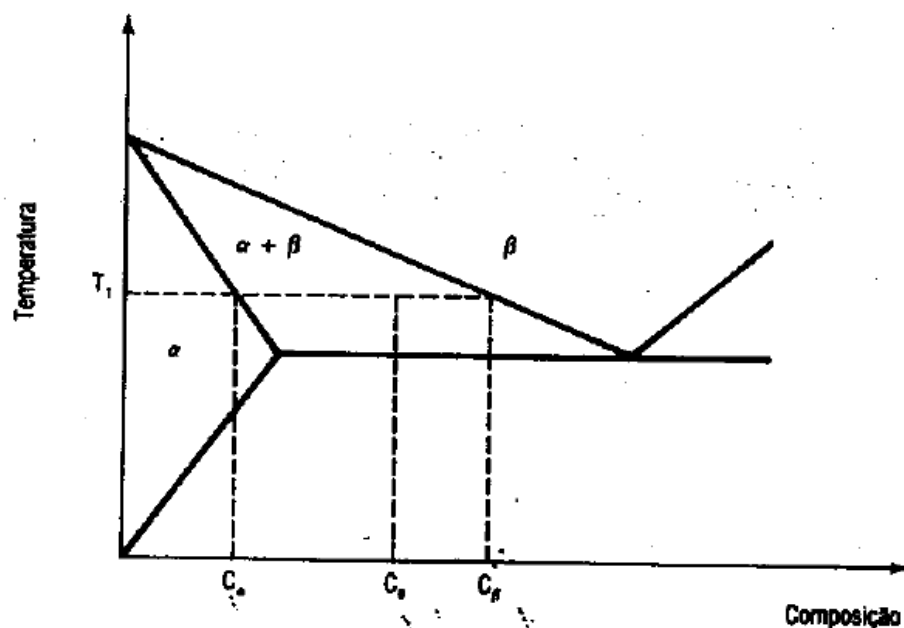
Até 912°C tem-se o ferro puro sob a forma alotrópica alfa e de 912 a 1394°C ele se apresenta no estado alotrópico gama. As diferenças entre esses estados alotrópicos são os reticulados cristalinos, o ferro alfa apresenta reticulado cúbico de corpo centrado e o ferro gama reticulado cúbico de face centrada. Por esse motivo, o ferro gama é capaz de manter o carbono em solução e o ferro alfa não. A austenita é a solução sólida de carbono do ferro gama, deste modo ela aparece apenas em temperaturas elevadas. [CHIAVERINI, 1988]

A máxima solubilidade de carbono no ferro gama corresponde a 2,11% de carbono e ocorre a 1148°C . [CHIAVERINI, 1988]

2.1.1 Regra da Alavanca

A regra da alavanca é uma relação que permite calcular a quantidade de constituintes que estão presentes no material e pode ser aplicada a qualquer região binária de um diagrama de equilíbrio. A Figura 2 mostra um diagrama de equilíbrio genérico para exemplificar como a fração volumétrica de cada fase é calculada utilizando-se a regra da alavanca. [COSTA SILVA, MEI, 1988]

Figura 2: Diagrama de equilíbrio bifásico genérico



Fonte: [COSTA SILVA, MEI, 1988]

Supõe-se que a liga apresente a Composição C0, na temperatura T1 a liga possui duas fases, alfa e beta e suas frações volumétricas são dadas pelas equações 1,2 e 3:

$$\% \alpha = \frac{c_{\beta} - c_0}{c_{\beta} - c_{\alpha}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\% \beta = \frac{c_0 - c_{\alpha}}{c_{\beta} - c_{\alpha}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\% \alpha + \% \beta = 100\% \quad (3)$$

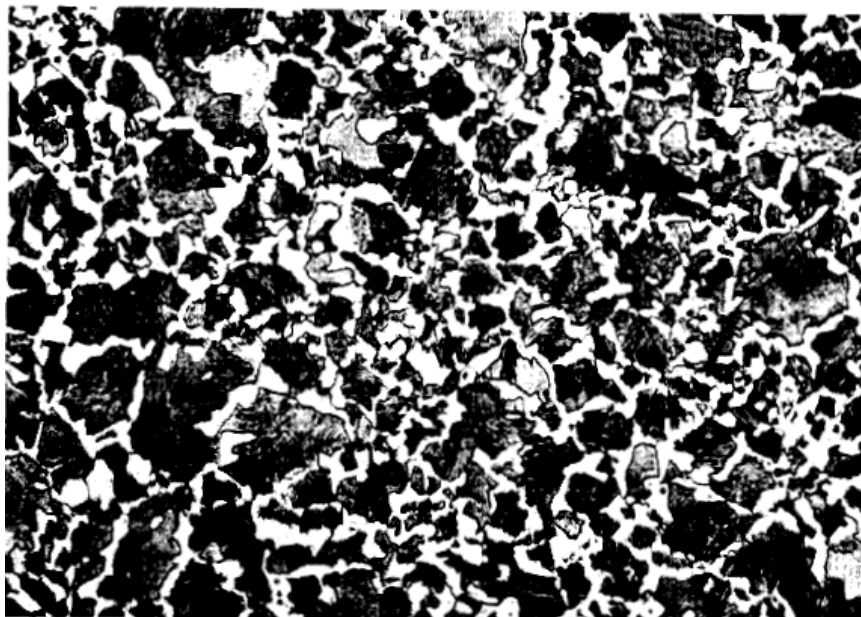
2.1.2 Classificação dos Aços

No diagrama de equilíbrio, a parte correspondente aos aços está entre 0,008 e 2,11% de C. De acordo com a porcentagem de carbono, esses aços são classificados em:

- hipoeutetóides: aços contendo entre 0,008% a 0,77% de C, os microconstituintes presentes nesses aços são ferrita e perlita;
- eutetóides: aços que contém 0,77% de C, esses aços apresentam apenas perlita na sua microestrutura;
- hipereutetóides: aços com porcentagem de carbono entre 0,77% e 2,11% de C, os microconstituintes são cementita e perlita. [CHIAVERINI, 2008]

As Figuras 3, 4 e 5 a seguir, mostram as microestruturas correspondentes a aços hipoeutetóides, eutetóides e hipereutetóides.

Figura 3: Micrografia de um aço hipoeutetóide esfriado lentamente



Fonte: [CHIAVERINI,1988]

Figura 4: Micrografia de um aço eutetóide esfriado lentamente



Fonte: [CHIAVERINI,1988]

Figura 5: Micrografia de um aço hipereutetóide esfriado lentamente



Fonte: [CHIAVERINI,1988]

2.1.3 Efeito dos Elementos de Liga

Há alguns elementos de liga que alargam a faixa de temperatura em que a austenita é estável, manganês, níquel e cobalto são exemplos de elementos que causa essa mudança.

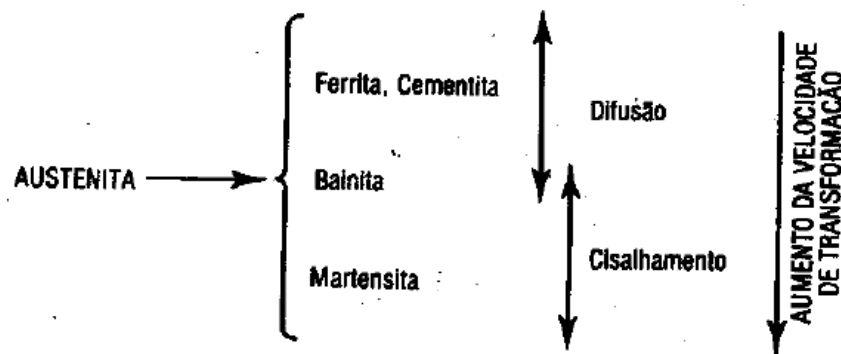
Outros elementos estreitam a faixa de temperaturas em que a austenita é estável, são eles: silício, cromo, molibdênio, fósforo, vanádio, titânio, alumínio. [CHIAVERINI,1988]

2.2 Diagramas TTT

De acordo com o diagrama de equilíbrio Fe-C, se resfriarmos um aço lentamente a partir do campo austenítico até a temperatura ambiente, encontraremos os microconstituintes ferrita, perlita e cementita, dependendo do teor de carbono do aço. Porém, há casos em que o resfriamento é rápido e surgem novos constituintes não apresentados no diagrama de equilíbrio, esses constituintes são a martensita e a bainita. [COSTA SILVA, MEI,1988]

Essa transformação da austenita em outro constituinte, pode ocorrer tanto por difusão quanto por cisalhamento, como o esquema da Figura 6 a seguir mostra.

Figura 6: Transformação da Austenita em outros microconstituintes

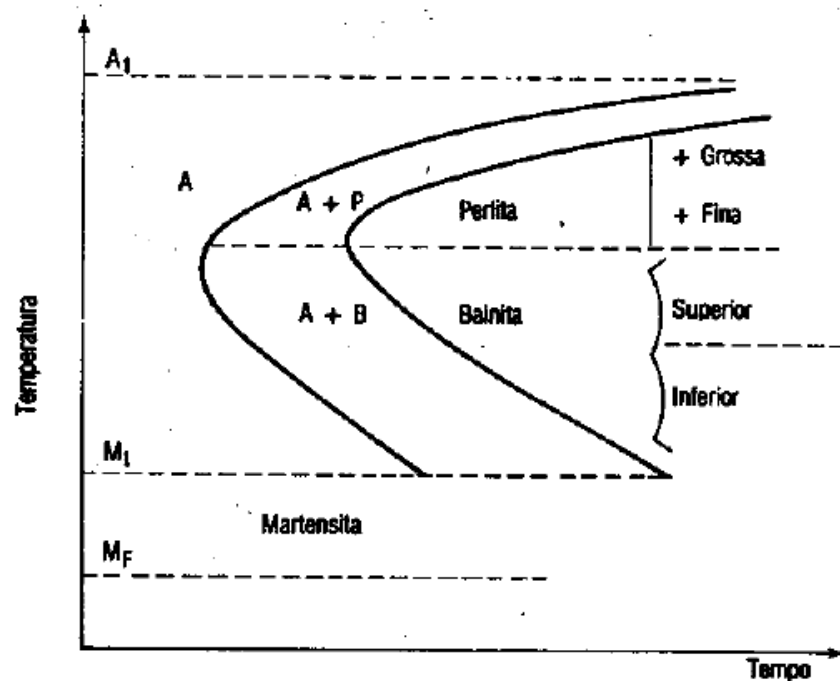


Fonte: [COSTA SILVA, MEI,1988]

Com maiores velocidades de resfriamento, a transformação da austenita passa a ocorrer em temperaturas cada vez mais baixas.

Para melhor compreender os fenômenos que ocorrem na transformação da austenita com o resfriamento rápido é utilizado um diagrama de transformação temperatura-tempo (TTT). A Figura 7 mostra o diagrama TTT de um aço eutetóide. [CHIAVERINI,2008]

Figura 7: Diagrama TTT de um aço eutetóide



Fonte: [COSTA SILVA, MEI,1988]

A primeira curva mostra o início da transformação da austenita enquanto a segunda mostra fim. As linhas M_i e M_f marcam o início e o fim da formação da martensita. É importante ressaltar que a formação da martensita só continua e termina se houver queda na temperatura, independentemente do tempo de permanência. [CHIAVERINI,2008]

Inicialmente a transformação demora para se iniciar a temperatura logo abaixo da crítica, porém, essa demora é cada vez menor com a diminuição da temperatura e em 550°C é alcançado o mais rápido início de transformação. Abaixo dessa temperatura, o tempo para que a transformação comece aumenta novamente enquanto a velocidade de transformação diminui. Quando a temperatura atinge os 200°C surge um novo constituinte, a martensita. [CHIAVERINI,1988]

Nas curvas dos aços hipoeutetóides, há o surgimento de outra linha (F_i) que indica a separação inicial da ferrita quando o aço entra na zona crítica. Já nos aços hipereutetóides a linha indica a separação inicial da cementita quando o aço entra na zona crítica. As curvas dos aços hipo e hipereutetóides são mostradas nas Figuras 8 e 9. [CHIAVERINI,1988]

Comparando as curvas dos aços hipo e hipereutetóides observa-se que o aumento do teor de carbono desloca a curva C para a direita, logo retarda o início e o fim da formação da perlita, a temperatura de formação da martensita é rebaixada pelo aumento do teor de carbono. [CHIAVERINI,1988]

Logo abaixo de A1, a velocidade de transformação ainda é muito baixa e tem-se a formação de perlita lamelar apresentando granulação grosseira e baixa dureza. Quando a temperatura atinge os 550°C a perlita apresenta textura fina e dureza mais elevada e é conhecida como perlita fina. Em temperaturas entre 550°C e 200°C, há a formação do constituinte bainita que apresenta dureza entre 40 e 60 Rockwell C. Por fim, para temperaturas entre 200° C e 100°C forma-se a martensita, que possui forma de agulhas e dureza muito elevada entre 65 e 67 Rockwell C. [CHIAVERINI,1988]

2.2.1 Fatores que afetam o Diagrama TTT

Existem alguns fatores que alteram a posição das curvas C, são eles:

- Composição química: como dito anteriormente, o aumento do teor de carbono desloca as curvas de início e fim da transformação da austenita para a direita além de mover as linhas M_i e M_f .
- Tamanho de grão da austenita: a transformação começa a ocorrer nos contornos de grão da austenita. Quanto maior o tamanho do grão mais demorada será a transformação da austenita, logo as curvas estarão deslocadas para a direita.
- Homogeneidade da austenita: Quanto mais homogênea a austenita estiver, mais deslocadas para direita serão as curvas em C. [CHIAVERINI,2008]

2.3 Constituintes

A austenita é uma solução sólida de carbono em ferro gama, apresenta grãos poligonais, possui boa resistência mecânica e tenacidade. [CHIAVERINI,1988]

A ferrita é uma solução sólida de carbono no ferro alfa, que para o ferro puro existe até 912°C. É formada por difusão e sua nucleação ocorre nos contornos de grão da austenita. [COSTA SILVA, MEI,1988] A ferrita apresenta grãos poligonais, é dúctil e possui baixa resistência à tração. [CHIAVERINI,1988]

A cementita (Fe_3C) possui estrutura cristalina ortorrômbica. [CHIAVERINI,1988] Esse constituinte é muito duro, e por esse motivo possui tenacidade muito baixa. [CHIAVERINI,2008]

A perlita é um microconstituente de ferrita (88,5%) e cementita (11,5%), Desse modo, ela apresenta características intermediárias entre os outros dois constituintes, apresentando resistência à tração em torno de 740 MPa. A perlita apresenta lamelas dispostas alternadamente [CHIAVERINI,1988]

A bainita é um constituinte obtido no resfriamento rápido, que pode ser classificado como superior ou inferior, dependendo da temperatura em que é formada.

A bainita superior é formada por finas ripas de ferrita com cementita precipitada no contorno. A bainita inferior apresenta-se na forma de agulhas similar a martensita. [COSTA SILVA, MEI,1988]

A martensita é uma fase metaestável que é formada devido ao resfriamento brusco da austenita, logo a transformação da austenita em martensita ocorre por cisalhamento da estrutura e não por difusão. [COSTA SILVA, MEI,1988]

O início da formação da martensita ocorre instantaneamente e quantidade de martensita formada cresce com a queda da temperatura. Para que a transformação continue a ocorrer a temperatura precisa cair até atingir valores abaixo da linha M_f .

Nos aços de baixo e médio carbono a martensita se apresenta na forma de ripas, uma estrutura fina com forma acicular. Possui elevada dureza e grande fragilidade. [CHIAVERINI,2008]

2.4. Tratamentos Térmicos

Tratamentos térmicos consistem em operações de aquecimentos e resfriamentos controlados que tem como objetivo alterar a microestrutura de aços e ligas para otimizar suas propriedades. Esses procedimentos englobam amplas faixas de temperatura, desde o tratamento subzero até a austenitização a 1280°C. As taxas de resfriamento são utilizadas para obter a estrutura exata desejada. [COSTA SILVA, MEI,1988]

A têmpera e o revenimento são operações de tratamento térmico aplicados à ligas ferrosas com o objetivo de adquirir propriedades de dureza e resistência mecânica. [CHIAVERINI,2008]

2.4.1 Temperabilidade:

Temperabilidade é a capacidade de endurecimento do aço durante a têmpera, ou seja, a facilidade de obtenção da martensita e o endurecimento uniforme em toda seção da peça. [COSTA SILVA, MEI,1988]

Fatores que diminuem a temperabilidade:

- granulação fina da austenita
- inclusões não dissolvidas

Fatores que aumentam a temperabilidade:

- elementos de liga (exceto o cobalto)
- granulação grosseira da austenita
- homogeneidade da austenita [CHIAVERINI,2008]

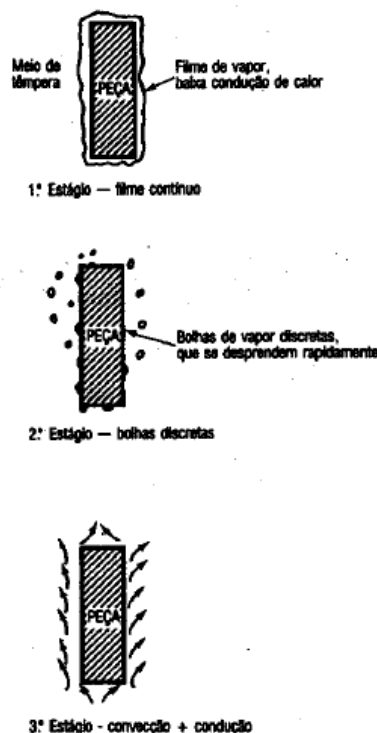
2.4.2 Têmpera

O tratamento térmico têmpera consiste em resfriar o aço rapidamente após a austenitização e desse modo obter uma estrutura martensítica. [COSTA SILVA, MEI,1988] Esse processo é feito em um meio com grande capacidade de resfriamento.

Esse tratamento é de grande importância, pois em conjunto com o revenimento, é possível obter estruturas que permitem a utilização dos aços em diversas aplicações. [CHIAVERINI,2008]

Os meios mais comuns de resfriamento são água, óleo, salmoura e ar. A Figura 10 a seguir mostra os estágios do resfriamento em meio líquido. [COSTA SILVA, MEI,1988]

Figura 10: Estágios do resfriamento em meio líquido



Fonte: [COSTA SILVA, MEI,1988]

O primeiro estágio consiste em uma formação de um filme de vapor sobre a peça. Essa fase deve ser o mais curta possível, pois se encontra na faixa de temperatura A1 e a temperatura de maior velocidade de reação perlítica. É comum haver a agitação da peça para romper o filme e reduzir a duração do primeiro estágio. O próximo estágio é a formação de bolhas de vapor sobre a peça, é importante que a agitação continue nesse estágio para evitar que as bolhas permaneçam muito tempo nos mesmos pontos, causando pontos resfriados lentamente. Por fim, o último estágio é o resfriamento por condução e convecção e é controlado pela capacidade calorífica do meio. [COSTA SILVA, MEI,1988]

2.4.2.1 Mecanismos de Resfriamento

Existem alguns fatores que podem afetar o mecanismo de resfriamento e devem ser levados em consideração:

- forma da peça, causa diferença de calor entre o núcleo e a superfície
- condições externas
- potencial de extração do calor do meio de resfriamento
- sólidos que podem se depositar na superfície da peça [CHIAVERINI,2008]

2.4.2.2 Tensões na Têmpera

O resfriamento brusco que ocorre na têmpera faz surgir gradientes de temperatura acentuados. Esses gradientes fazem com que tensões internas se originem na peça, devido a:

- Contração do aço
- Expansão ligada a transformação martensítica
- Mudanças bruscas de seção

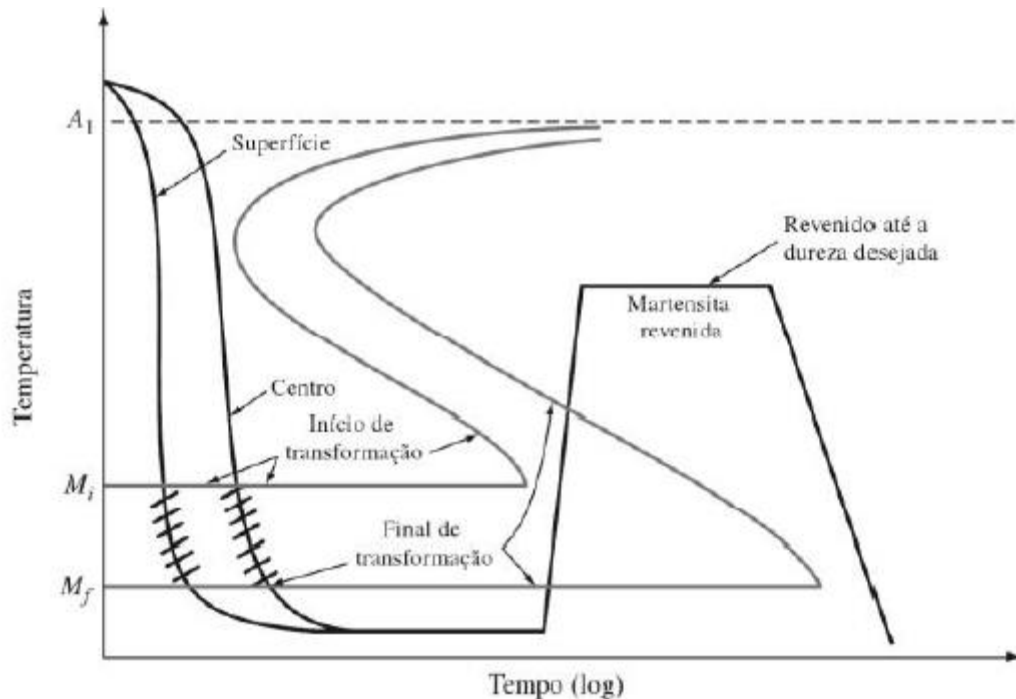
Essas tensões podem causar empeno da peça, ruptura e tensões residuais. Quanto mais severo for o meio da têmpera, maior será sua deformação e a chance de aparecerem trincas na peça. [COSTA SILVA, MEI,1988]

2.4.2 Revenimento

Após a têmpera a martensita se encontra extremamente dura e frágil, o que causa um alto tensionamento interno e conseqüentemente o risco de surgirem trincas na peça. Por esse motivo faz-se o emprego de um segundo tratamento térmico, o revenimento.

O revenimento é o aquecimento do aço a uma temperatura abaixo da transformação eutetóide, com o objetivo de deixar o aço mais dúctil. O processo de têmpera e revenimento é mostrado na Figura 11 abaixo. [REED-HILL,1982]

Figura 11: Gráfico do processo de têmpera e revenimento



Fonte: [REED-HILL,1982]

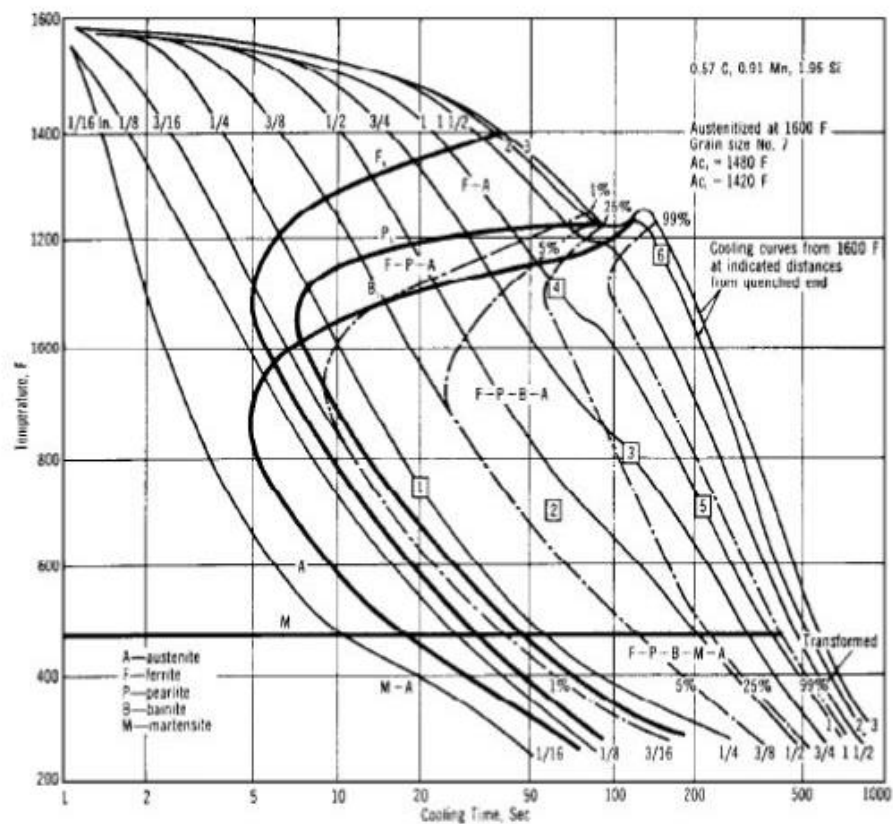
Existem diferentes estágios do revenimento para as diferentes temperaturas aplicadas, são eles:

- Até 250°C: ocorre a difusão do carbono na martensita em aços que possuem menos de 0,25% de C. Já em aços com mais 0,25% de C ocorre a precipitação do carboneto em forma de ripas o que reduz o teor de carbono da martensita.
- de 200°C a 350°C: pode-se observar a decomposição da austenita retida formando ferrita e cementita com características de bainita.
- de 350°C a 700°C: ocorre o coalescimento da cementita e ela se torna esferoidal, também nota-se uma redução na densidade de discordâncias e a formação de grãos equiaxiais de ferrita com partículas esferoidais de cementita, isso corre por conta da recrystalização. [COSTA SILVA, MEI,1988]

2.5 Aço SAE 9260

O aço SAE 9260 é considerado uma composição especial onde o teor de silício é suficientemente alto para ser considerado uma liga. A principal aplicação para esse aço são molas. Porém ele pode ser utilizado também em diversas aplicações de construção mecânica, barras de torção, facas e espadas. Este aço é aplicado em situações em que a resistência ao impacto é importante. A dureza desse tipo de aço geralmente fica entre 58 e 63 HRC e sua temperabilidade é alta. [CHANDLER,1994] O Diagrama CCT do aço está mostrada na Figura 12 abaixo.

Figura 12: Diagrama CCT do aço SAE 9260



Fonte: [CHANDLER,1994]

Devido ao alto teor de Si, este aço pode apresentar, durante o revenimento, precipitação do carboneto de transição épsilon (ϵ), que com o aumento da temperatura ou do tempo de revenimento pode se transformar em cementita. Por causa desse carboneto, os aços ao Si demonstram maior resistência a quente e resistência ao amolecimento quando revenido. [MARCOMINI, 2014]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente trabalho foram utilizadas 9 amostras do aço SAE 9260, retiradas de uma barra circular laminada de 25 mm de diâmetro. As amostras foram cortadas com as dimensões: diâmetro de 25 mm e altura 8mm. As amostras foram obtidas de uma barra do aço SAE 9260 enviada pela empresa Bardella SA Indústria Mecânicas e possuem a seguinte composição: 0,59%C; 0,93% Mn; 1,91% Si; 0,027% P e 0,001% S.

A Tabela 1 a seguir mostra a nomenclatura das amostras e as respectivas temperaturas dos tratamentos a que elas foram submetidas.

Tabela 1: Relação entre as amostras e o tratamento térmico aplicado

Amostra	Têmpera	Revenimento
0.0	-	-
1.1	850°C	-
1.2	850°C	250°C
1.3	850°C	350°C
1.4	850°C	450°C
2.1	950°C	-
2.2	950°C	250°C
2.3	950°C	350°C
2.4	950°C	450°C

Fonte: Autor

3.1 Tratamentos térmicos: têmpera e revenimento

No tratamento térmico de têmpera, foram empregadas duas temperaturas de austenitização, 850°C e 950°C. Essas temperaturas foram escolhidas de acordo com a análise da curva CCT do aço.

Para realizar esse tratamento térmico, as amostras foram colocadas em uma caixa contendo carvão, a fim de evitar a descarbonetização do aço, por esse apresentar alto teor de carbono e colocadas no forno durante uma hora.

O tempo de patamar foi de 1 hora, as amostras foram resfriadas em um recipiente com óleo à temperatura ambiente.

Após o resfriamento das amostras, foi realizado o tratamento de revenimento a fim de aliviar as tensões provenientes da têmpera. No revenimento foram empregadas três

temperaturas, 250°C, 350°C e 450°C. Nesta etapa, as amostras permaneceram novamente no forno durante 1 hora e depois de retiradas foram resfriadas ao ar.

3.2 Ensaio Dureza

Foi realizado o ensaio de dureza nas amostras a fim de observar a influência das temperaturas aplicadas nos tratamentos térmicos e a variação da dureza no material. A medição da dureza foi realizada em três pontos diferentes de cada amostra a fim de diminuir a incerteza da medida.

Para esse ensaio foi utilizado o durômetro LECO modelo RT-240, com penetrador cone de diamante, ângulo de 120° e carga de 150 Kgf. Erro associado de +/- 0,5 HRC

3.3 Análise de inclusões e Microestrutural

A análise de inclusões é a primeira análise que deve ser realizada em aços, para investigar seu nível de limpeza. A ocorrência das inclusões em aços é inerente ao processo de fabricação, salvo, quando inclusões exógenas por incidentes que não fazem parte do processo de fabricação, como fratura de refratários da lingoteira ou dos veios de lingotamento contínuo que caem dentro do aço líquido. A quantidade, tamanho, forma das inclusões podem interferir nas propriedades mecânicas dos aços. A análise de inclusões é realizada após polimento, sem ataque, com aumento de 100X, conforme a norma ASTM E45.

Essa análise realiza uma comparação entre a micrografia e o quadro classificatório composto por quatro tipos de inclusão: sulfeto, alumina, silicato e óxido. A inclusão é avaliada segundo sua dimensão (série fina ou grossa) e volume na amostra.

A análise microestrutural é utilizada a fim de evidenciar o efeito da têmpera e do revenimento na microestrutura do aço e como as temperaturas de austenitização e de revenimento afetam os microconstituintes do material.

Para a realização das micrografias, foi necessário preparar as amostras. Desse modo, foi realizado o seu lixamento com as lixas 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1000. Depois do polimento, as peças foram polidas com óxido de cromo em uma politriz. Posteriormente as amostras foram levadas ao microscópio e as inclusões foram analisadas com um aumento de 100X, conforme ASTM E45. Após essa primeira análise, as amostras foram submetidas ao reagente nital 2%, durante 5 segundos e levadas novamente ao microscópio onde foram fotografadas com aumentos de 100X, 500X e 1000X.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de Dureza

Após serem temperadas e revenidas as amostras foram submetidas ao ensaio de dureza. Desse modo, foi possível obter a curva de revenimento do aço SAE 9260 nas temperaturas de austenitização 850°C e 950°C. A Tabela 2 exhibe os resultados da dureza e a curva de revenimento está representada na Figura 13.

Tabela 2: Média das durezas medidas nas amostras

Amostra	Dureza Média
0.0 (ST)	(28,0+/-0,5) HRC
1.1 (A850°C – SR)	(58,0 +/-0,5) HRC
1.2 (A850°C – R250°C)	(52,0 +/- 0,5) HRC
1.3 (A850°C – R350°C)	(54,0 +/-0,5) HRC
1.4 (A850°C – R450°C)	(43,0 +/-0,5) HRC
2.1 (A950°C – SR)	(64,0 +/-0,5) HRC
2.2 (A950°C – R250°C)	(56,0 +/-0,5) HRC
2.3 (A950°C – R350°C)	(53,0 +/-0,5) HRC
2.4 (A950°C – R450°C)	(49 +/-0,5) HRC

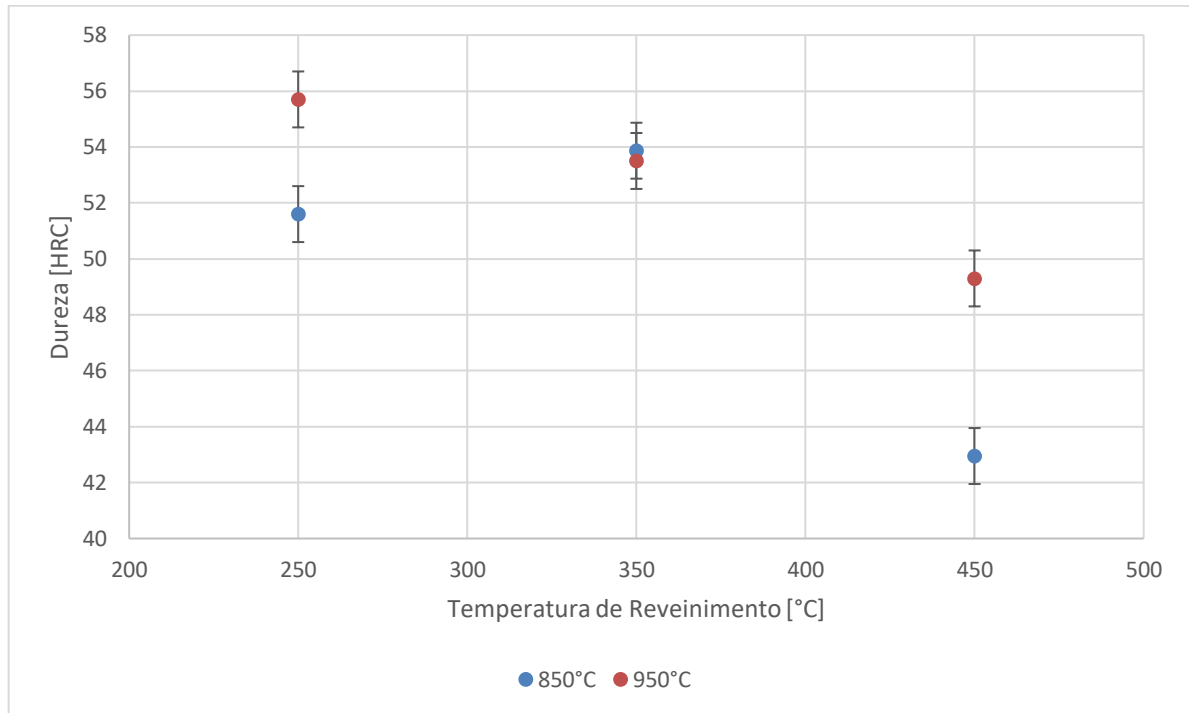
Fonte: Autor

Analisando os resultados da medida de dureza para cada uma das amostras, pode-se notar a grande diferença comparando a amostra no estado de fornecimento, bruto, laminado, que apresenta dureza em torno de 28 Rockwell C com as amostras submetidas aos tratamentos de têmpera e revenimento, que apresentam durezas entre 49 e 65 Rockwell C.

Comparando as amostras tratadas, é possível observar também que as amostras que foram apenas temperadas apresentam durezas maiores do que aquelas que foram temperadas e revenidas. Além disso, conclui-se que quanto maior a temperatura de austenitização maior será a dureza da amostra, pois a amostra 2.1 que foi submetida à temperatura de austenitização 950°C apresenta dureza 64.03 Rockwell C enquanto a 1.1 que foi austenitizada à 850°C apresenta dureza 58.27 Rockwell C.

Por fim, é possível observar o efeito da temperatura de revenimento nas peças, e assim entender que quanto maior é a temperatura utilizada nesse tratamento, menor será a dureza da amostra.

Figura 13: Curvas de revenimento obtidas para o aço SAE 9260



Fonte: Autor

Analisando-se a curva de revenimento, pode-se notar que o aumento da temperatura de austenitização de 850 para 950, gera um aumento da dureza. Isso ocorre porque a maior temperatura gera maior solubilização do carbono e forma maior quantidade de martensita e martensita mais saturada.

É possível observar que para as duas temperaturas de austenitização há um pico de dureza no material. Na temperatura de austenitização 850°C, este pico ocorre no revenimento a 350°C e a dureza é 54 HRC. Normalmente, este aço não apresenta endurecimento secundário, uma vez que o Si favorece formação de carbonetos. Assim, em processos convencionais de fabricação de aços, o Si formará preferencialmente, inclusões não metálicas do C, $\text{SiO}_2 \cdot \text{M}_x\text{O}_y$ (ASTM E 45), o que não foi observado na amostra na análise de inclusões. Ainda assim, pode-se especular alguns fenômenos. Este pequeno aumento de dureza pode estar relacionado à precipitação de carboneto de transição (ϵ), que apresenta uma estrutura hexagonal compacta e é mais duro que a cementita. Para testar essa hipótese, seria necessário fazer um experimento de variação do tempo de encharque fixando as temperaturas de revenimento. Um outro fenômeno que pode afetar a dureza é a fragilização da martensita

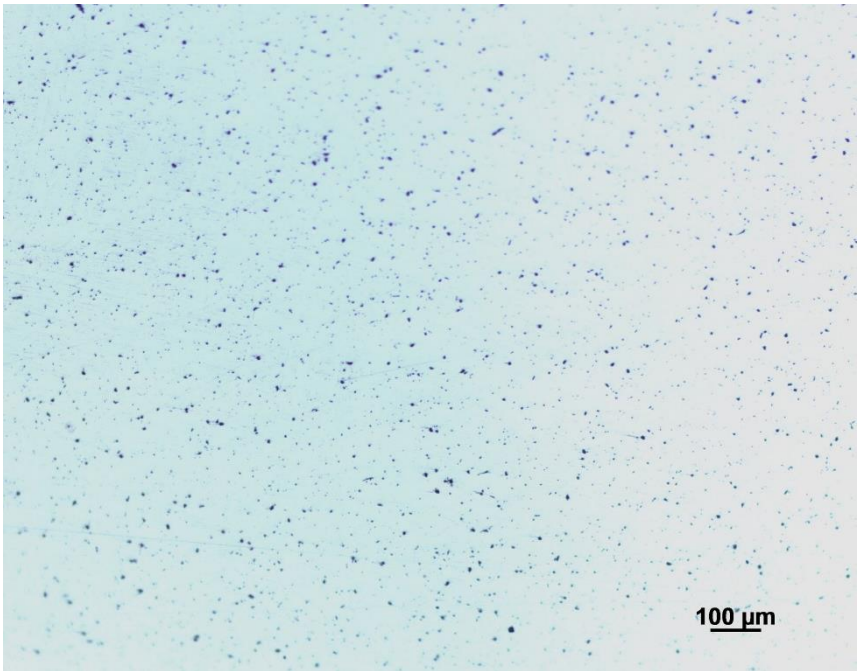
revenida (FMR), que ocorre devido à precipitação de filmes de cementita intra ou inter-ripas de martensita e que causa uma redução da energia absorvida no ensaio de impacto, com consequente fragilização e, possivelmente, ligeiro aumento de dureza [MARCOMINI, 2014]. Para que este fenômeno fosse comprovado, deveria ser realizado ensaio de impacto. Já com a temperatura de austenitização 950°C, o pico ocorre com o revenimento a 250°C, apresentando uma dureza de 56 HRC.

Após a dureza máxima, observa-se o decaimento da dureza, isso ocorre devido à precipitação mais intensa de carbonetos, com o aumento da temperatura de revenimento, bem como o coalescimento dos carbonetos precipitados, que passam a ser mais grosseiros. Nota-se uma queda de dureza mais acentuada entre as amostras austenitizadas em 850°C e revenidas em 350°C e 450°C. Muito provavelmente isto pode ter ocorrido pela menor solubilização do aço e consequente, precipitação mais grosseira em temperaturas mais altas combinadas ao engrossamento das partículas já existentes.

4.2 Análise de inclusões e Microestrutural

As inclusões são partículas não metálicas resultantes do processo de fabricação do aço. A análise de inclusões mostra a qualidade do material. A Figura 14 mostra as inclusões presentes na amostra no estado de fornecimento e a Tabela 3 representa a classificação das inclusões.

Figura 14: Inclusões presentes na amostra no estado de fornecimento. Aumento 100x. Sem ataque



Fonte: Autor

Tabela 3 – Análise de inclusões conforme ASTM E45

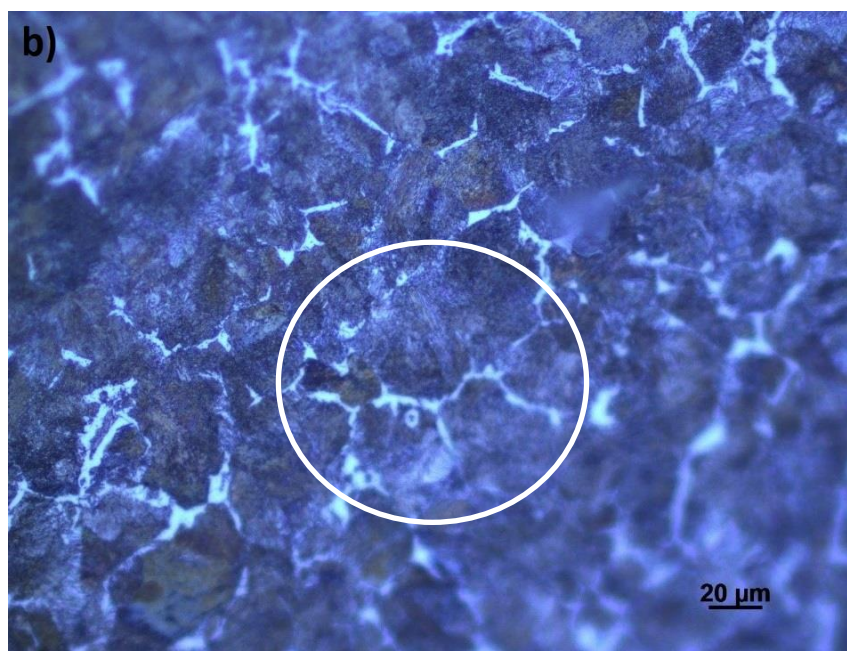
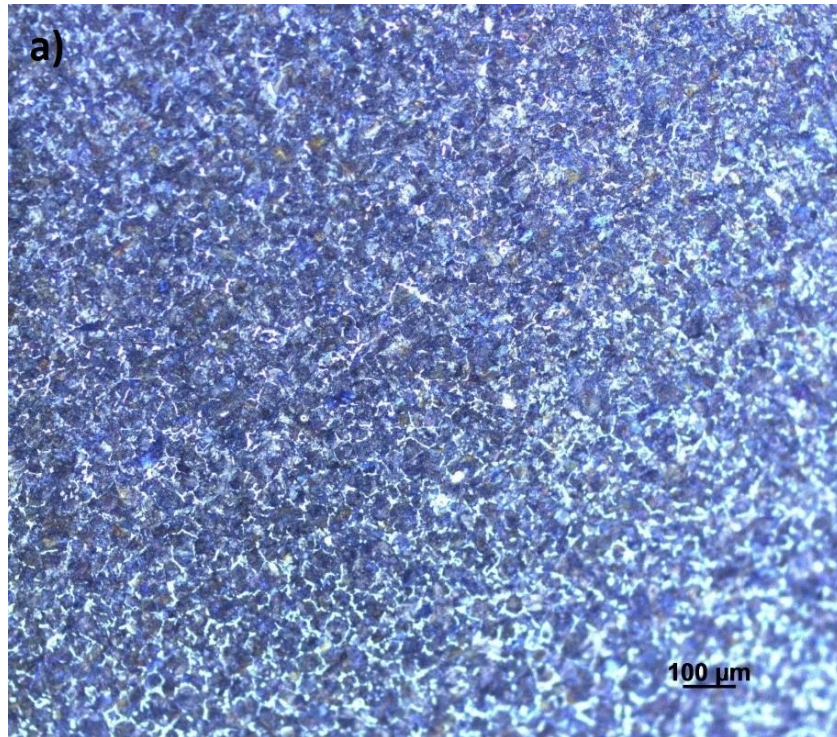
SÉRIE FINA				SÉRIE GROSSA			
A	B	C	D	A	B	C	D
2	2	-	2,5	1	1	-	1

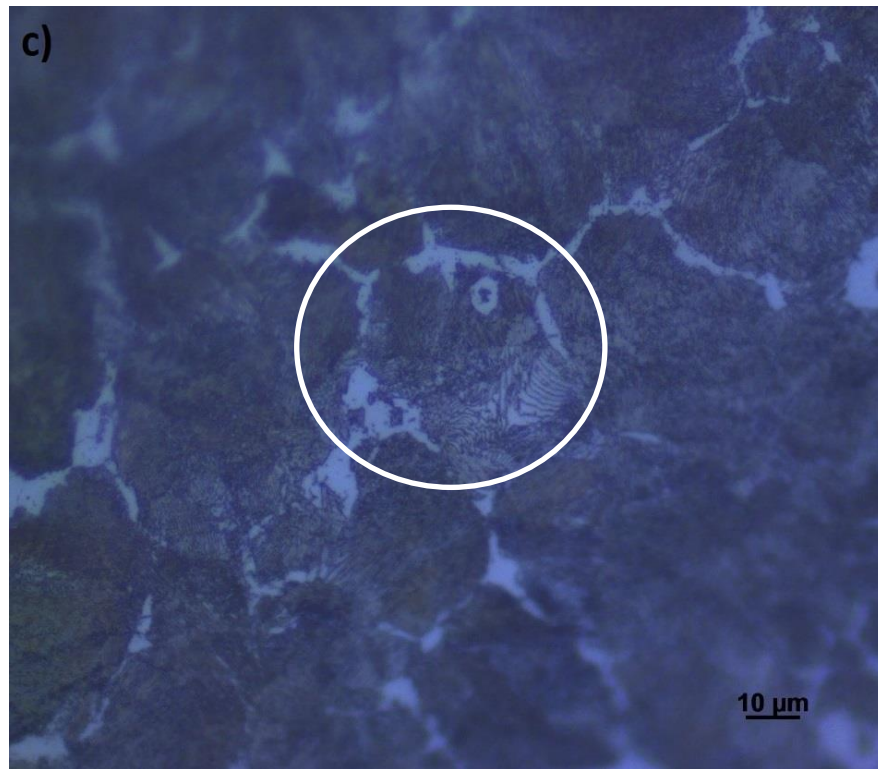
A-SULFETOS, B-ALUMINAS, C-SILICATOS, D-ÓXIDOS GLOBULARES

Fonte: Autor

As micrografias da amostra original e das amostras submetidas a tratamentos térmicos são exibidas nas Figuras 15 a 19 abaixo.

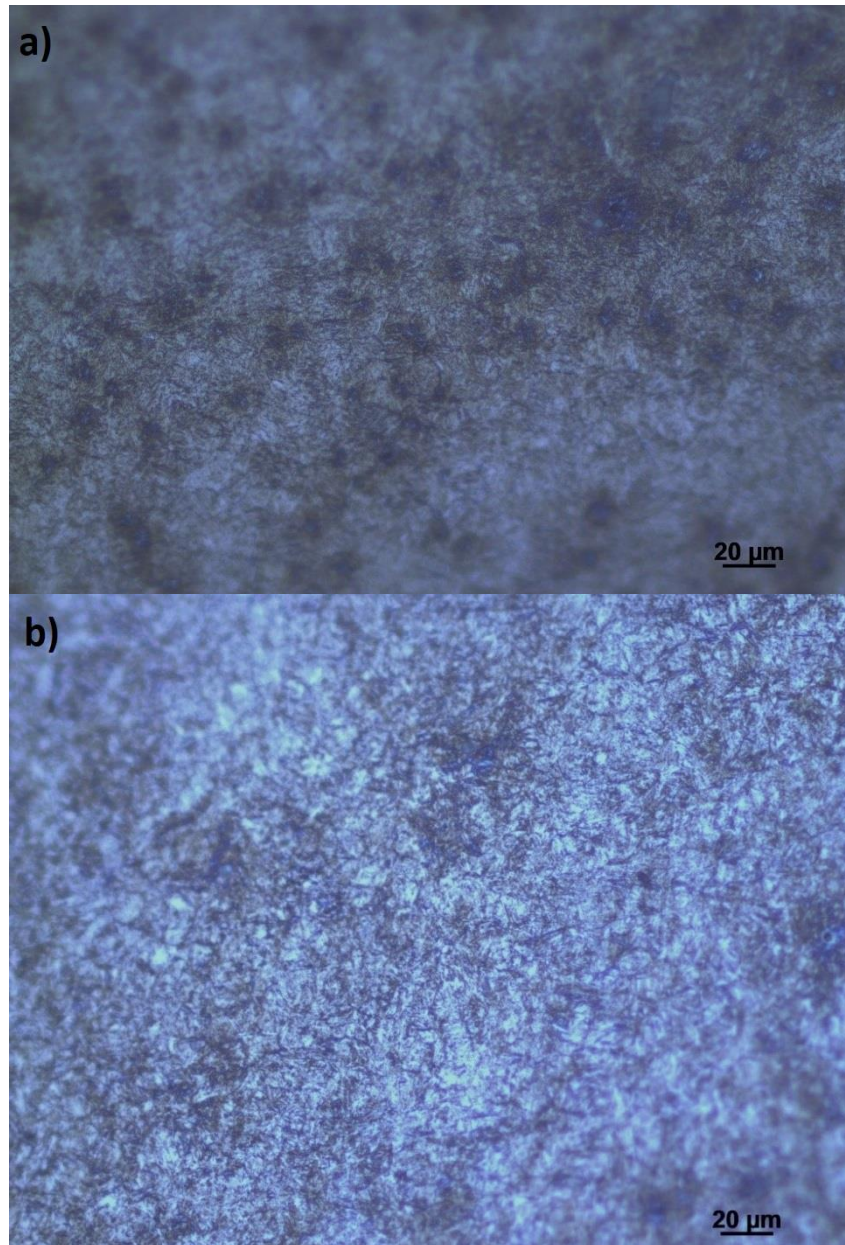
Figura 15: Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 no estado de fornecimento (bruto laminado). Ataque: nital 2%. a) com aumento de 100x apresentando estrutura constituída de ferrita e perlita, b) com aumento de 500x c) com aumento de 1000x. Nota-se o detalhe da ferrita próeutetóide nos contornos de grãos de perlita (círculo branco)





Fonte: Autor

Figura 16 – Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 58HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 64HRC, ambas sem revenimento. Ataque Nital 2%. Estrutura predominantemente martensítica.

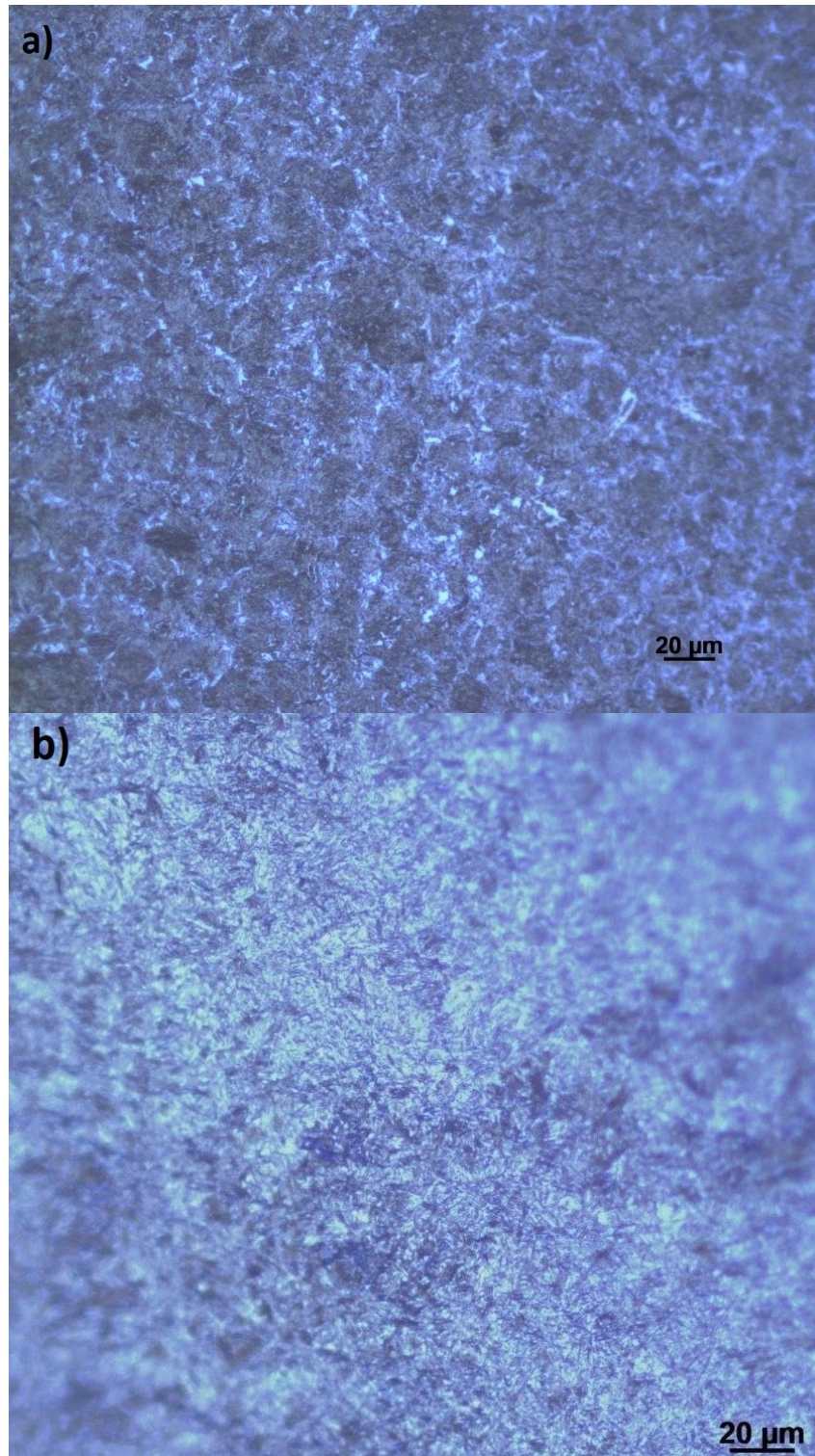


Fonte: Autor

Pela análise das imagens em microscópio óptico da microestrutura das amostras temperadas e sem revenimento, não se pode deduzir a causa da maior dureza alcançada pela amostra austenitizada em 950°C (64HRC), em relação à amostra austenitizada em 850°C (58HRC). A teoria explica esse fato pela maior solubilização do carbono e, neste caso, do

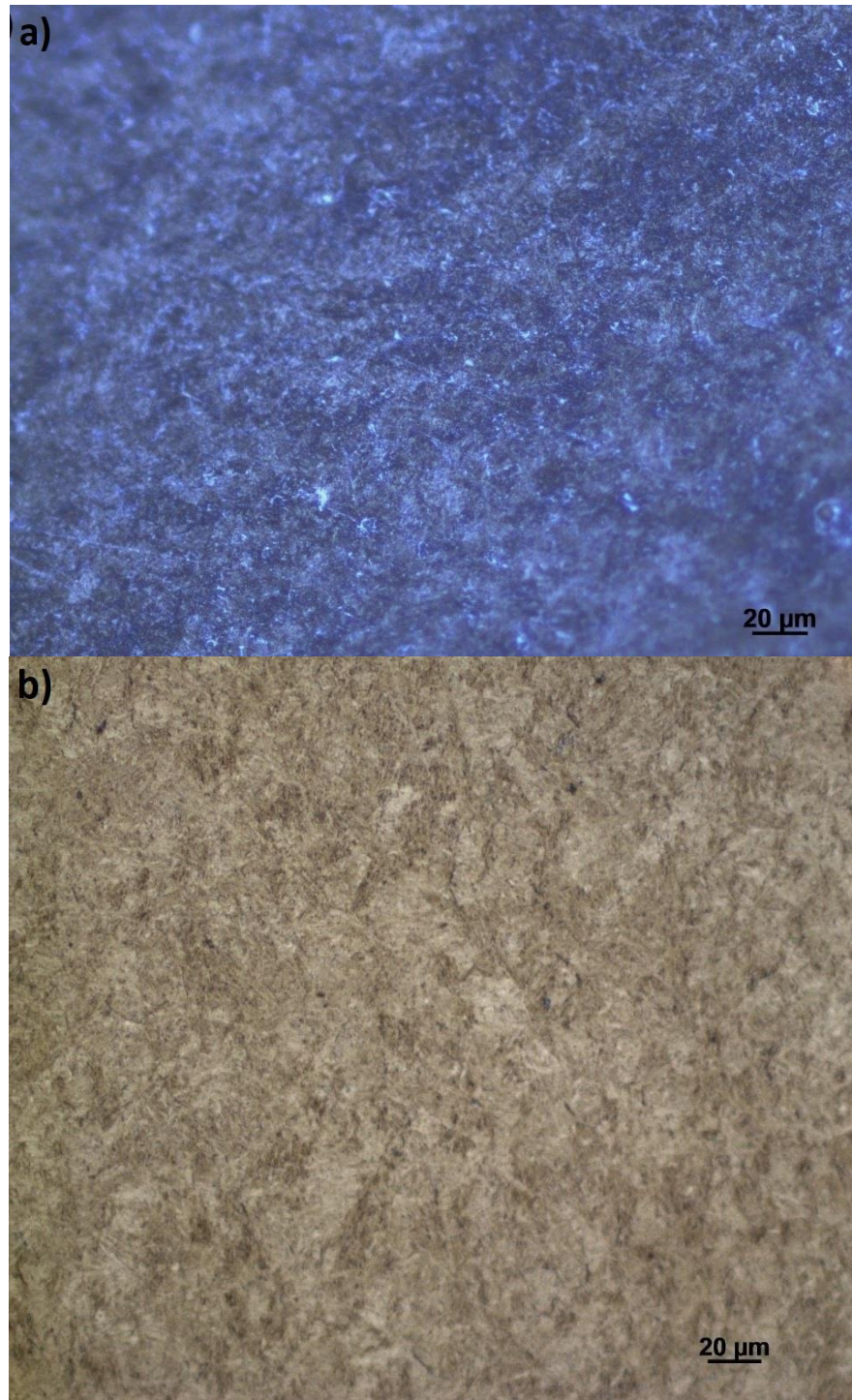
silício e manganês, que podem favorecer a formação de uma martensita com maior saturação de elementos em seus interstícios.

Figura 17 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 52HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 56HRC, ambas com revenimento a 250°C. Ataque Nital 2%. Estrutura predominantemente martensítica, com alguns carbonetos precipitados



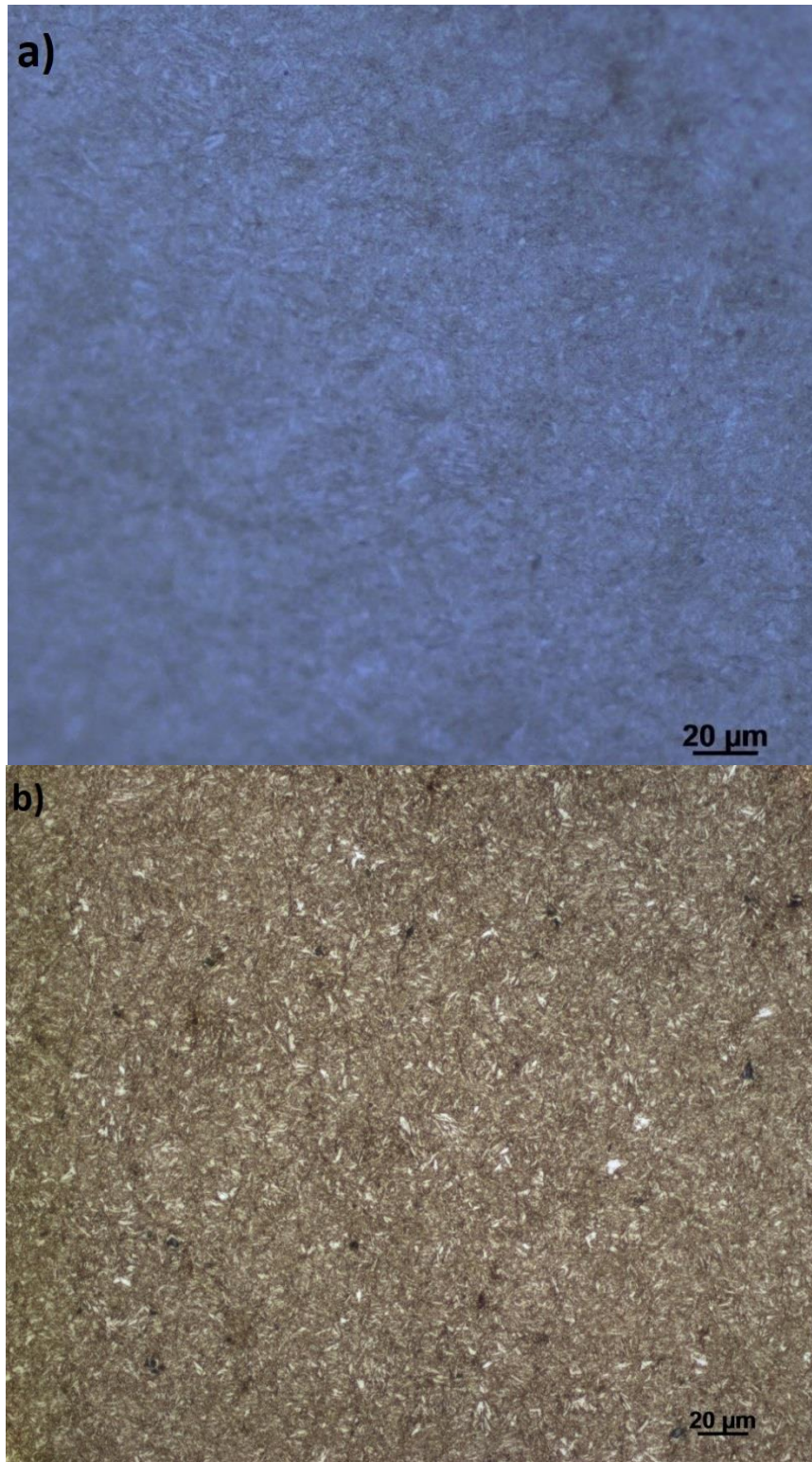
Fonte: Autor

Figura 18 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 54HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 53HRC, ambas com revenimento a 350°C. Ataque Nital 2%. Nota-se uma quantidade maior de carbonetos



Fonte: Autor

Figura 19 - Imagem de microscópio óptico comum das microestruturas do aço SAE 9260 com temperatura de austenitização 850°C (a), dureza de 43HRC e austenitizada em 950(b), dureza de 49HRC, ambas com revenimento a 450°C. Ataque Nital 2%. Nota-se uma quantidade maior de carbonetos.



Fonte: Autor

Nos revenimentos realizados a temperaturas mais baixas, o aço já começa a perder dureza, porém não há mudanças estruturais notáveis. Com o aumento da temperatura de revenimento, por exemplo a 350°C, já é possível notar transformações estruturais e assim

observar a origem martensítica e a diminuição da dureza. Por fim, para temperaturas mais altas de revenimento a dureza cai consideravelmente e é possível observar partículas de cementita precipitada. [CHIAVERINI, 2008]

A micrografia da amostra original mostra a microestrutura do aço hipoeutetóide contendo ferrita e perlita.

Observando a microestrutura dos aços submetidos aos tratamentos térmicos é possível observar a matriz martensítica que era esperada ao submeter as amostras ao revenimento. É possível observar a martensita em ripas, a qual recebe esse nome por conta da sua pequena largura e é característica dos aços de baixo a médio carbono.

5. CONCLUSÕES

A partir do presente trabalho é possível observar os efeitos tanto da temperatura empregada na austenitização quanto da empregada no revenimento para o aço SAE 9260.

Analisando o resultado das medições de dureza, é possível observar a grande diferença entre a amostra original 28.43 HRC e as amostras tratadas que apresentam valores entre 49 e 65 HRC. Além disso, como era esperado, as amostras que foram submetidas somente à têmpera apresentam valores de dureza maiores do que as amostras que foram submetidas também ao revenimento. Quanto às temperaturas aplicadas no processo de revenimento, conclui-se que quanto maior a temperatura que a peça foi submetida, menor será a dureza da amostra.

Observando as micrografias obtidas, nota-se a presença de ferrita e perlita na amostra original e nas amostras tratadas termicamente é possível observar a presença de uma matriz martensítica, que justifica o aumento da dureza das amostras.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E45**: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshocken, PA: ASTM, 2018.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels: microstructure and properties**. 2006. BH Pub.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais, uma introdução—sétima edição**. LTC, Salt Lake City, Utah, 2006.

CHANDLER, Harry (Ed.). **Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels**. ASM international, 1994.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços Carbono e Aços Liga**. Geologia e Metalurgia. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. 1954

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos. 6ª Edição**. São Paulo, SP, 1988.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. ABM, 2008.

COSTA SILVA, André Luiz da; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. Edgar Blücher/Villares Metals: Sao Paulo, Brazil, 1988.

FERRAZ, Henrique. **O aço na construção civil**. Revista eletrônica de ciências. São Paulo, n. 22, 2003.

MARCOMINI, J.B., GOLDENSTEIN, H. - Characterization of a New Fe-C-Mn-Si-Cr Bearing Alloy: Tempered Martensite Embrittlement Susceptibility, **Journal of Materials Engineering and Performance**, Volume 23(3) March 2014.

REED-HILL, R. **Princípios de Metalurgia Física**, segunda edição. 1982

SAE/AISI 9260 | **Aço-Liga p/ Beneficiamento (Silício-Manganês)**. Disponível em: <<https://aco.com.br/aco/9260/>>. Acesso em: 28 de setembro de 2019

VOTORAÇO **Os usos do aço na construção mecânica**. Disponível em: <<https://www.votoraco.com.br/os-usos-do-aco-na-construcao-mecanica/>>

WILLIAN, FSJH. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Copyright, 5ª edição, 2012.