



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

HEDIPO PEREIRA DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS 1020, 1045, 5160, 8620
APÓS OS DETERMINADOS TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS DE
TÊMPERA, REVENIMENTO, NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO.

FORTALEZA

2021

HEDIPO PEREIRA DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS 1020, 1045, 5160, 8620 APÓS
OS DETERMINADOS TIPOS DE TRATAMENTO TÉRMICOS DE TÊMPERA,
REVENIMENTO, NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da
Silva.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S235c Santos, Hedipo Pereira dos.

Caracterização microestrutural dos aços 1020, 1045, 5160, 8620, após os determinados tipos de tratamentos térmicos de têmpera, revenimento, normalização e recozimento. / Hedipo Pereira dos Santos. – 2021.

74 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

1. Aço Carbono . 2. Tratamentos Térmicos . 3. Microestrutura . 4. Título. I. Título.

CDD 669

HEDIPO PEREIRA DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS 1020, 1045, 5160, 8620 APÓS
OS DETERMINADOS TIPOS DE TRATAMENTO TÉRMICOS DE TÊMPERA,
REVENIMENTO, NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da
Silva.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar e permitir desfrutar de uma família maravilhosa e das oportunidades que eu tive até os dias de hoje.

Aos meus pais: José Alberto e Maria de Socorro, por me completar com ensinamentos peculiares de moral, caráter e integridade. Ambos foram sempre constantes no apoio, incentivo e mostrando a importância do conhecimento e esforço. Obrigado por serem meus pais e ter a plena convicção desse orgulho por vocês.

Agradecer aos meus irmãos Antonio Hédio e Hedyeny que estão sempre presentes em todas as horas.

A todos os meus familiares, em particular, minha tia Francismar Feitosa, que sempre me apoiou, incentivando e me ajudando de todas as maneiras possíveis.

A minha esposa Rafaelly, pelo amor, carinho, dedicação, pela enorme paciência, amizade, compreensão nos momentos de estresse e do companheirismo em todo o período de graduação.

A minha filha Maria Liz, pelo amor, pela luz, pela esperança e força que ela me proporciona todos os dias da minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcelo José, pela oportunidade deste trabalho e, principalmente, pela orientação, por todo conhecimento transmitido, pela compreensão, pela paciência, pelo apoio grandioso, por ter acreditado e confiado no meu potencial.

Ao laboratório de Metalográfica e de Caracterização microestrutural (LACAM), ao de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS), por disponibilizar seus bolsistas, Dyego Almeida, Davi Ribeiro e os equipamentos necessários para preparação dos corpos de prova.

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ricardo Emílio, Hamilton Ferreira, Jeferson Klug, Igor Frota, Enio Pontes, Francisco Marcondes, Raimundo Leite, Walney Silva, Marcelo José, Hélio Miranda, Marcelo Ferreira, Elineudo Moura, Sonia Castelo Branco e Janaina Machado, por todos ensinamentos claramente transmitidos, pela motivação e pela excelente contribuição, por meio de atitudes, de um grande profissional.

Aos grandes amigos que fiz durante o período de graduação, Darley Lima, Ruy Alves, Marcelo Angelotto, Stefano Feitosa, Diego Coelho, Filipe Morais, Wallison Gomes, Emerson Edilson, Davi Ribeiro, Lincoln Guimaraes, Roberto Abreu, Narain Brito, Lucas Uchoa, Lucas Abreu, Gabriel Gonczarowska, Hector Picarte, Alessandro Gums, Stayne Ribeiro, Caio Italo, Andrey Sindeaux, Ivon Chaves, Aglaiton Oliveira, Junior Moura, Francisco Ribeiro, Bruno Minelly, Dyego Almeida, Marcos Daniel, Emanuel Seixas, Reginaldo, Renan Gurgel, Jefferson Vieira,

Diego Dias, Natan Lima, que de certa forma contribuíram por meio de conselhos, inspirações, diversão, companheirismo e diversas horas de estudo compartilhadas.

“Viva como se fosse morrer amanhã. Aprenda como se fosse viver para sempre.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Na indústria metalomecânica, há processos e procedimentos de grande utilidade, que são dependentes dos tratamentos térmicos. Pois, com eles, torna-se possível a mudança das propriedades do material e assim, deixando-lhes nas condições ideais para aplicação. Os aços carbonos possuem diversas aplicações como: setor automobilístico, fabricação de utensílios metalmeccânicos, setor aeroespacial, setor nuclear entre outros. Essa grande atração por tais aços é devido a eles serem materiais de baixo custo e de grande aplicação no meio industrial. Os aços SAE 1020, 1045, 5160 e 8620 deste trabalho foram escolhidos por serem de grande valia para o mercado metalmeccânico e por preencherem, de forma satisfatória, as possíveis aplicações mais praticadas no atual mercado mundial em componentes que, porventura, possam sofrer possível tratamento térmico para sua manutenção. Este trabalho tem como objetivo estudar as modificações microestruturais de determinados tratamentos térmicos nos aços SAE 1020, 1045, 5160 e 8620, que são amplamente utilizados na indústria metalmeccânica. Foi utilizado uma caracterização metalográfica dos materiais em seu estado como fornecido. Em seguida foi realizada uma análise comparativa com as amostras que foram submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera, normalização e recozimento, em uma faixa de temperatura padronizada de 850 °C, e um tratamento térmico de revenimento, na temperatura 600°C. Com a análise de microscopia óptica foi possível realizar uma análise qualitativa das fases presentes de todas as amostras. Assim, concluiu-se que os aços 1020, 1045, 5160 e 8620 estão intimamente relacionados com os constituintes esperados nos seus diagramas TTTs, e que a padronização de temperatura dos tratamentos térmicos, no devido projeto, tornou-se efetiva.

Palavras-chave: Aço carbono. Microestrutura. Tratamento Térmico.

ABSTRACT

In the metal mechanical industry, there are processes and procedures that are dependent on the heat treatments possible to change the properties of the material when using these materials, thus leaving them in ideal conditions for application. Carbon steels have several applications such as: the automotive sector, manufacturing of metal-mechanical tools, aerospace sector, nuclear sector, among others. This great attraction for such steels is due to the fact that they are low cost materials and widely used in the industrial environment. The SAE 1020, 1045, 5160 and 8620 steels in this work were chosen because they are of great value to the metal-mechanical market and because they satisfactorily fill the most common possible applications in the current world market in components that may suffer as possible heat treatment for their maintenance. This work aims to study the microstructural modifications of certain heat treatments in SAE 1020, 1045, 5160 and 8620 steels, which are widely used in the metal-mechanical industry. A metallographic characterization of the materials in their as received condition was used, then a comparative analysis was performed with the samples that were subjected to heat treatments of tempering, normalization and annealing, in a standardized temperature range of 850°C, and a heat treatment of tempering, in a temperature of 600°C. With the analysis of optical microscopy it was possible to perform a qualitative analysis of the phases present in all samples. Thus, it was concluded that the 1020, 1045, 5160 and 8620 steels are closely related to the expected constituents in their TTTs diagrams and that the temperature standardization of the heat treatments, in due project, became effective.

Keywords: Carbon steel. Heat treatment. Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático de interação dos critérios importantes em um aço carbono	21
Figura 2. Formas alotrópicas do Ferro Puro	23
Figura 3. Evolução microestrutural de um aço hipoeutetóide	24
Figura 4. Diagrama de fase Fe-C, caracterizado por uma região delimitada	24
Figura 5. Diagrama TTT	25
Figura 6. Diagrama TTT a partir de medições da porcentagem da transformação em função do logaritmo do tempo	25
Figura 7. Diagrama TTT para aço SAE 1020	26
Figura 8. Diagrama TTT para aço SAE 1045	27
Figura 9. Diagrama TTT para aço SAE 5160	27
Figura 10. Diagrama TTT para aço SAE 8620	28
Figura 11. Diagrama de transformação por resfriamento contínuo para uma liga ferro - carbono.	29
Figura 12. Diagrama CCT para aços carbonos em diferentes meios de resfriamento: (a) forno, (b) ar, (c) ar soprado, (d) óleo e (e) água.	29
Figura 13. Processo comportamento da austenita sobre a taxa de resfriamento	33
Figura 14. Ferrita intragranular (1) e ferrita alotriomórfica (2)	34
Figura 15. Micrografia óptica de Widmanstätten em placas laterais	35
Figura 16. Representação esquemática do nódulo de perlita a partir da austenita	35
Figura 17. Lamelas alternadas de ferrita e cementita (1), agregados de ferrita e carbonetos (2) e perlita não-lamelar (3)	36
Figura 18. Fotomicrografias de perlita fina (a) e perlita grosseira (b)	36
Figura 19. Diagrama da porcentagem dos constituintes, quando resfriado lentamente	37
Figura 20. Microestrutura martensita em forma de ripas	38
Figura 21. Microestrutura martensita em forma de lenticular	38
Figura 22. Diagrama Fe-C com as morf. da martensita em função do percent. de carbono	39
Figura 23. Transformação da austenita em martensita revenida	39
Figura 24. Processo da martensita revenida	40
Figura 25. Martensita revenida 4000x	40
Figura 26. Diagrama de transf. tempo e temp., na condição de alguns tratamentos térmicos	41
Figura 27. Zona de austenitização do diag. Fe-C (A) Equi., (Ar) Refr., (Ac) Aquecimento	42
Figura 28. Transformação de um aço baixo carbono com resfriamento lento	43
Figura 29. Representação do tratamento de têmpera de um aço carbono	44
Figura 30. Representação do tratamento de revenido de um aço carbono	44
Figura 31. Regime de tempo-temp. no trat. de normalização: (a) Aquecimento, (b) austenitização, (c) arrefecimento ao ar, (d) arrefecimento ao ar ou ao forno	45
Figura 32. Região processual de tratamento térmico de recozimento pleno.	46
Figura 33. Amostras iniciais	47
Figura 34. Diag. Fe-C rep. o resf. do aço a partir da temp. de austenitização à 850°C	48
Figura 35. Amostra com suporte para os tratamentos térmicos	49
Figura 36. Forno	49
Figura 37. Microscópio óptico Zeiss acoplado ao software Action Vision	51
Figura 38. Fluxograma das etapas para realização do trabalho	52
Figura 39. Mic. da amos. 1020, como recebido e atacado com nital 2%. Aumento de 500x	53
Figura 40. Mic. da amos. 1045, como recebido e atacado com nital 2%. Aumento de 500x	54
Figura 41. Mic. da amos. 5160, como recebido e atacado com nital 2%. Aumento de 500x	55
Figura 42. Mic. da amos. 8620, como recebido e atacado com nital 2 %. Aumento de 500x	56

Figura 43. Mic. da amos. 1020 temperada em óleo e atacada com nital 2%. A. de 500x	57
Figura 44. Mic. da amos. 1045 temperada em óleo e atacada com nital 2 %. Aume. de 500x	58
Figura 45. Mic. da amos. 5160 temperada em óleo e atacada com nital 2 %. Aume. de 500x	59
Figura 46. Mic. da amos. 8620 temperada em óleo e atacada com nital 2%. Aume. de 500x	60
Figura 47. Mic. da amos. 1020 revenida e atacada com nital 2%. Aumento de 500x	61
Figura 48. Mic. da amos. 1045 revenida e atacada com nital 2%. Aumento de 500x	62
Figura 49. Mic. da amos. 5160 e atacada com nital 2%. Aumento de 500x	63
Figura 50. Mic. da amos. 8620 revenida e atacada com nital 2%. Aumento de 500x	64
Figura 51. Mic. da amos. 1020 normalizada e atacada com nital 2%. Aumento de 500x	65
Figura 52. Mic. da amos. 1045 normalizada e atacada com nital 2 %. Aumento de 500x	66
Figura 53. Mic. da amos. 5160 normalizada e atacada com nital 2%. Aumento de 500x	67
Figura 54. Mic. da amos. a 8620 e atacada com nital 2%. Aumento de 500x	68
Figura 55. Mic. da amos a 1020 recozida plenamente e atacada com nital 2%. A. de 500x	69
Figura 56. Mic. da amos. 1045 recozida plenamente e atacada com nital 2%. A. de 500x	70
Figura 57. Mic. da amos. 5160 recozida plenamente e atacada com nital 2%. A. de 500x	71
Figura 58. Mic. da amos. 8620 recozida plenamente e atacada com nital 2%. A. de 500x	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Funções típicas dos elementos secundários presente nos aços carbonos comuns	22
Tabela 2. Propriedade características do aço SAE 1020	31
Tabela 3. Propriedade característica do aço SAE 1045	32
Tabela 4. Propriedade característica do aço SAE 5160	32
Tabela 5. Propriedade característica do aço SAE 8620	33
Tabela 6. Nomenclatura das amostras	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SAE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CCC	Norma Brasileira Regulamentar
CFC	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
pm	Sistema Integrado de Bibliotecas
Ferro γ	Austenita
Ferro δ	Perlita δ
Ferro α	Ferrita
LPTS	Laboratório de Pesquisa e Tecnologia de Soldagem
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
TCC	Célula unitária Tretagonal de Corpo Centrado
TTT	Diagrama de Transformação em função do Tempo e da Temperatura
TI	Diagrama de Transformação Isotérmica
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
W	Tungstênio
Ms	Linha de inicio da transformação martensítica
Mf	Linha de término da transformação martensítica
MO	Microscopia óptica
ASM	American Society for Metals
PVV	Politriz Lixadeira de Velocidade Variável
NBR	Norma Brasileira Regulamentar

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivos gerais	20
2.2. Objetivos específicos	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. Aços	21
3.2. Estrutura cristalina	23
3.3. Diagrama ferro carbono	
3.4. Diagrama temperatura - tempo - transformação	25
3.5. Diagrama de transformação por resfriamento contínuo	28
3.6. Aço 1020	30
3.7. Aço 1045	30
3.8. Aço 5160	31
3.9. Aço 8620	32
3.10. Caracterização microestrutural	32
3.10.1. Microestrutura	33
3.10.1.1 Austenita	33
3.10.1.2. Ferrita	34
3.10.1.2.1. Ferrita de Widmanstätten	34
3.10.1.3. Perlita	35
3.10.1.4. Cementita	37
3.10.1.5. Martensita	37
3.10.1.5.1. Martensita revenida(Martensita + Carbonetos)	39
3.11. Tratamento térmico	41
3.11.1. Fatores que afetam os tratamentos térmicos	41
3.11.2. Têmpera	43
3.11.3. Revenimento	44
3.10.4. Normalização	45
3.10.5. Recozimento pleno	45
4. MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1. Preparação dos corpos de provas	47
4.2. Tratamento térmico aplicados	48
4.2.1. Preparação das amostras para tratamento térmico	48
4.2.2. Têmpera	50
4.2.3. Revenimento	50
4.2.4. Normalização	50
4.2.5. Recozimento pleno	50
4.3. Caracterização metalográfica	51
4.3.1. Microscopia ótica	51
4.4. Fluxograma do trabalho	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1. Análise micrográfica	53
5.1.1. Micrografia das amostras padrões	53
5.1.2. Análise micrográfica das aços temperados em óleo	56
5.1.3. Análise micrográfica dos aços revenidos	60
5.1.4 Análise micrográfica dos aços normalizados	64

5.1.5. Análise micrográfica do aço recozidos	68
6. CONCLUSÃO	73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre aços têm sido amplamente difundidos com o passar dos anos, pelo grande motivo e interesse da indústria metalúrgica e mecânica sobre o metal e suas aplicações. Apesar da intensa competição que vem sofrendo há décadas, o aço tem conseguido manter-se como o material com maior número de aplicações no mundo atual, em virtude de sua grande versatilidade nas propriedades mecânicas, químicas e físicas.

Sendo assim, evidencia-se a existência de dois alicerces que estão interligados na ciência e engenharia de materiais, e que são de extrema e fundamental importância, que são o desempenho e processamento do material, no qual a estrutura do material fica dependente da maneira como ele é processado.

O desempenho de um material dependerá de suas propriedades, dessa forma, existe uma inter-relação entre processamento, estrutura, propriedade e desempenho de um material.

Adicionalmente, o extraordinário leque de propriedades exibidos pelos diversos tipos de aços é conseguido por meio de simples variações de composição ou por meio do processamento térmico ou mecânico que possa sofrer.

A visão de utilidade e prosperidade na metalmeccânica está a cada dia procurando potencializar a relação de funcionalidade e o tempo desta. Nos últimos anos, a teoria dos tratamentos térmicos desenvolveu-se muito rapidamente.

Este desenvolvimento foi obtido devido a uma maior utilização de suposições científicas e de métodos experimentais da física dos metais, em que, a visão objetiva era um melhor entendimento da natureza, dos mecanismos e da cinética das variações estruturais, bem como dos princípios das modificações das propriedades dos metais e ligas sujeitos à ação do calor.

Isso tudo, devido à necessidade de uma evolução de conceitos, e conseqüentemente, uma evolução de materiais para a indústria.

Nesse contexto, o tratamento térmico aplicado aos aços em estudo nos permitirá analisar alterações microestruturais, mudança do tamanho de grão e modificação na forma e posição.

As observações nas estruturas encontradas na natureza, utilizando a microscopia óptica, promoveu uma extensão natural de observar, a olho nu, e assim representando um papel importantíssimo para o surgimento das ciências da natureza, biológicas, anatômica, mineralogia, petrografia e etc. A partir de 1863, quando Sorby apresentou suas observações sobre as estruturas dos aços, foi possível ficar permanentemente no centro do conjunto das tecnologias e da ciência.

Os aços em estudo neste trabalho se diferenciam pela quantidade de carbono, pela distinta composição química de elementos de liga e por diferentes processos de fabricação.

Os resultados obtidos sofreram uma análise qualitativa da sua morfologia microestrutural, assim promovendo uma avaliação clara e conclusiva sobre os aços analisados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

- Esse trabalho tem como objetivo analisar as modificações dos aços SAE 1020, 1045, 5160 e 8620 quando submetidos a tratamentos térmicos de têmpera em óleo, revenimento, normalização e recozimento pleno.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar dados através da microscopia ótica, sobre as morfologias que o material demonstrou após os tratamentos térmicos.
- Estudar de forma qualitativa, as fases e os constituintes presentes no material com os tratamentos térmicos e correlacionando com o material no seu estado como recebido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços

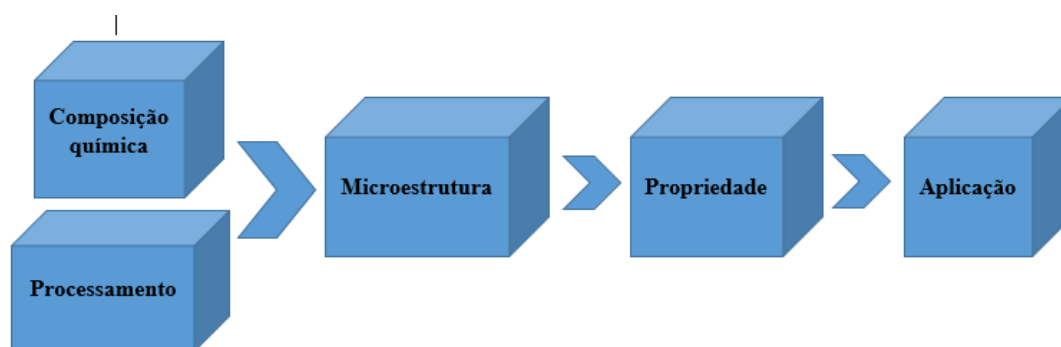
São materiais metálicos, com grande utilidade na confecção de peças, ferramentas ou estruturas. Apresentando uma vasta área de aplicação e características particulares, que proporciona seu grande desenvolvimento atual. Como por exemplo: baixo custo de obtenção, enorme versatilidade de propriedades que se obtém com mudanças em sua composição química, tratamentos térmicos e processamentos.

Com intuito de atender com eficiência suas aplicações, esta variedade está intimamente relacionada com a necessidade ininterrupta de adequações dos produtos e das exigências do mercado. Tendo suas aplicações correlacionadas com as propriedades mecânicas, composição química ou até na forma de execução (CHIAVERINI, 2008).

Tendo todas essas características, um favorecimento propício para seu desenvolvimento.

E com o esquemático da figura 1, temos um satisfatório condicionamento do trabalho inicialmente apresentado.

Figura 1. Esquemático de interação dos critérios importantes em um aço carbono.



Fonte: Próprio autor.

Os aços pertencem ao grupo das ligas metálicas ferrosas que tem como característica o elemento ferro como principal constituinte. Essas ligas contêm outros elementos que garantem determinadas propriedades. Em um aço, temos geralmente um teor de carbono de 0,008% até 2,11%, tal elemento tem como principal característica aumento da dureza. (CHIAVERINI, 2008). Tem-se conhecimento da presença de outros elementos nos aços carbonos, tais como: níquel, cromo, manganês, molibdênio, tungstênio, vanádio, silício, cobalto, alumínio, titânio, cobre, nióbio, zircônio, boro, chumbo, etc.

Cada um desses elementos influencia diretamente e indiretamente em algumas propriedades do material.

Todos esses elementos possuem um propósito intencional, e, que na maioria das vezes, entram em sua composição durante o processo de fabricação do componente. A influência destes elementos, ocorre pela alteração da microestrutura por diversos fatores, inclusive nos tratamentos térmicos, alterações nas temperaturas de transformação de fase, alterações da solubilidade do carbono na ferrita e austenita, alteração nas velocidades de transformação da austenita em ferrita e cementita ou martensita, e pelo aumento da temperatura de decomposição da martensita.

Onde as ligas ferrosas abrangem os aços e os ferros fundidos, como os materiais de grande versatilidade nas propriedades físicas e mecânicas. (CALLISTER *et al.*, 2013).

Na tabela 1, temos os principais elementos de ligas ferrosas e os fatores nos quais eles influenciam.

Tabela 1. Funções típicas dos elementos secundários presente nos aços carbonos comuns.

Fatores influenciados	ELEMENTOS													
	C	Mn	P	S	Nb	Pb	Cu	Co	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
Redução da soldabilidade	X													
Aumento da resistência à abrasão											X			
Aumento da resistência à corrosão											X			
Ação desoxidante		X							X					X
Aumento da temperabilidade											X	X		
Aumento da resistência em altas temperaturas	X				X							X	X	
Redução da ductilidade	X		X	X										
Aumento da resistência ao impacto										X				
Aumento da dureza	X	X	X		X				X			X	X	
Aumento da resistência	X	X	X				X		X	X			X	

Fonte: Próprio autor.

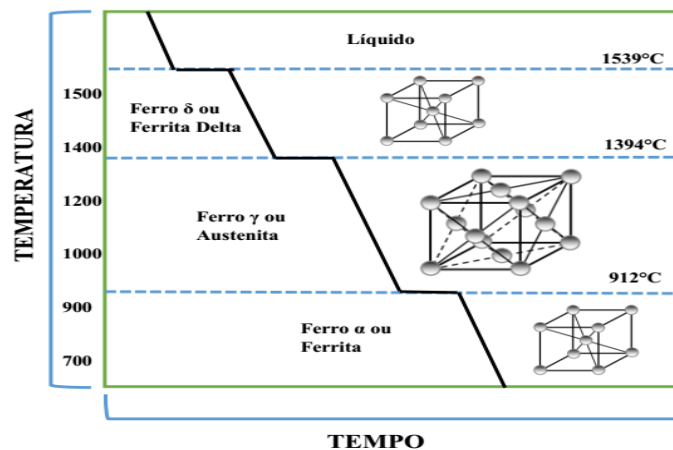
3.2. Estrutura cristalina

Os metais são constituídos por um aglomerado compacto de átomos, arranjados ordenadamente, denominado estrutura cristalina. Os átomos costumam ser representados por esferas rígidas como se fossem bolas de bilhar. Embora esta forma de representação seja bastante simplificada, visto que com ela é possível explicar as propriedades físicas e mecânicas dos metais (CALLISTER *et al.*, 2013).

Os átomos têm diferentes raios atômicos e que a organização espacial desses átomos ocasiona diferentes estruturas cristalinas (CALLISTER *et al.*, 2013).

Temos no ferro, um elemento peculiar, que apresenta uma propriedade intrínseca, chamada de alotropia. Propriedade essa, de modificar sua estrutura cristalina dependendo da temperatura em que se encontra. Aonde na condição de ferro puro, teremos uma estrutura CCC (Cúbica de Corpo Centrado) até a temperatura de 912°C, composto por oito átomos nos vértices da célula unitária cúbica e um átomo no centro do cubo. Acima da temperatura de 912°C até 1394°C, configuramos o ferro de forma alotrópica CFC (Cúbica de Fase Centrada) ou comumente chamado de Ferro γ , formado por 8 átomos de ferro, situados nos vértices de uma célula unitária cúbica e por 6 átomos de ferro, situados nas faces do cubo.

Figura 2. Formas alotrópicas do Ferro Puro



Fonte: Próprio autor

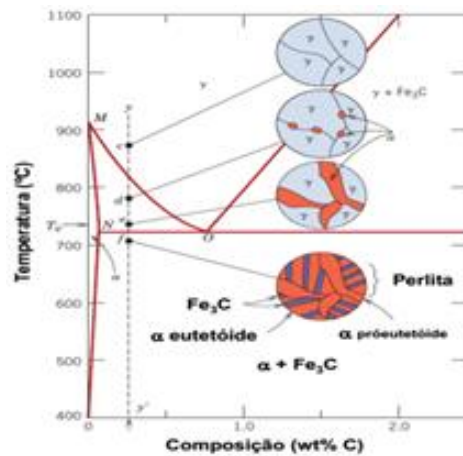
3.3. Diagrama ferro carbono

O diagrama de equilíbrio dos aços exprime uma tendência das possíveis microestruturas presentes nos aços. Nesses gráficos temos uma relação de composição e temperatura em que as fases dos aços se encontram estáveis e metaestáveis, assim permitindo um limite sobre a condição de equilíbrio (KRAUSS, 1990).

Os aços carbonos geralmente têm as seguintes microestruturas: austenita, ferrita, perlita, bainita, cementita e martensita, que são relações de ferro e carbono. Esses constituintes em um aço podem aparecer isolados ou em conjunto, o que ocasiona características específicas em cada tipo de aço (CALLISTER *et al.*, 2013).

Na figura 4, temos apresentado a formação de uma microestrutura possível de um aço carbono hipoeutetóide (teor de carbono abaixo de 0,76%), classificação essa que se enquadra nos aços carbonos desse trabalho. Tendo esse diagrama uma possível alteração sobre as microestruturas resultante, quando influenciado por tratamentos térmicos.

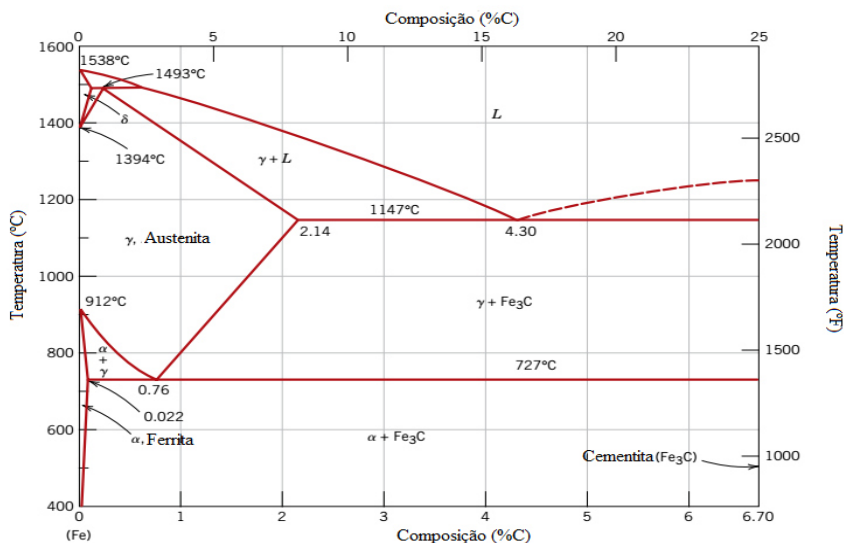
Figura 4. Evolução microestrutural de um aço hipoeutetóide.



Fonte: Adaptado do Callister *et al.*, 2013.

No diagrama de equilíbrio termodinâmico, apresentado na figura 5, temos as diferentes fases de um aço carbono correlacionadas com suas faixas de temperaturas.

Figura 5. Diagrama de fase Fe-C, caracterizado por uma região delimitada.

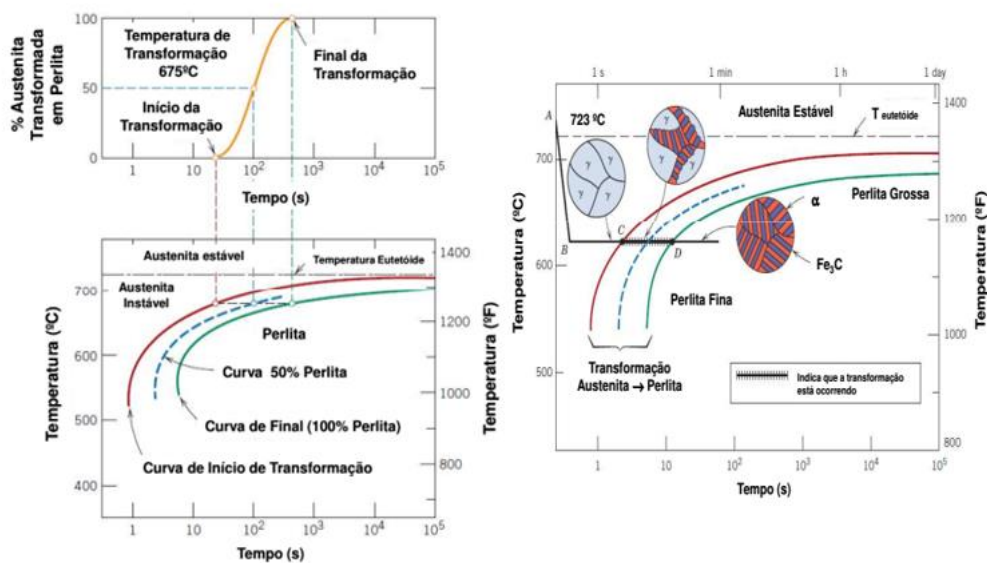


Fonte: Adaptado do Callister *et al.*, 2013

3.4. Diagrama temperatura – tempo - transformação

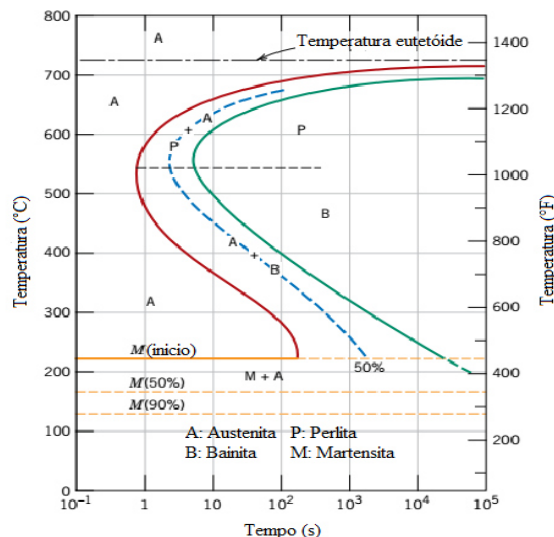
O diagrama TTT (temperatura-tempo-transformação), também conhecido como curva C ou diagrama TI (transformação isotérmica). Esse diagrama permite determinar para cada temperatura, o tempo necessário para o início e o fim das transformações isotérmicas da austenita em outros constituintes. (KRAUSS, 1980; BARREIRO, 1985). As Figuras 6 e 7 representam o diagrama TTT e suas relações com o tempo e as microestruturas esperadas

Figura 6. Diagrama TTT.



Fonte: Adaptado do Callister *et al.*, 2013.

Figura 7. Diagrama TTT a partir de medições da porcentagem da transformação em função do logaritmo do tempo.



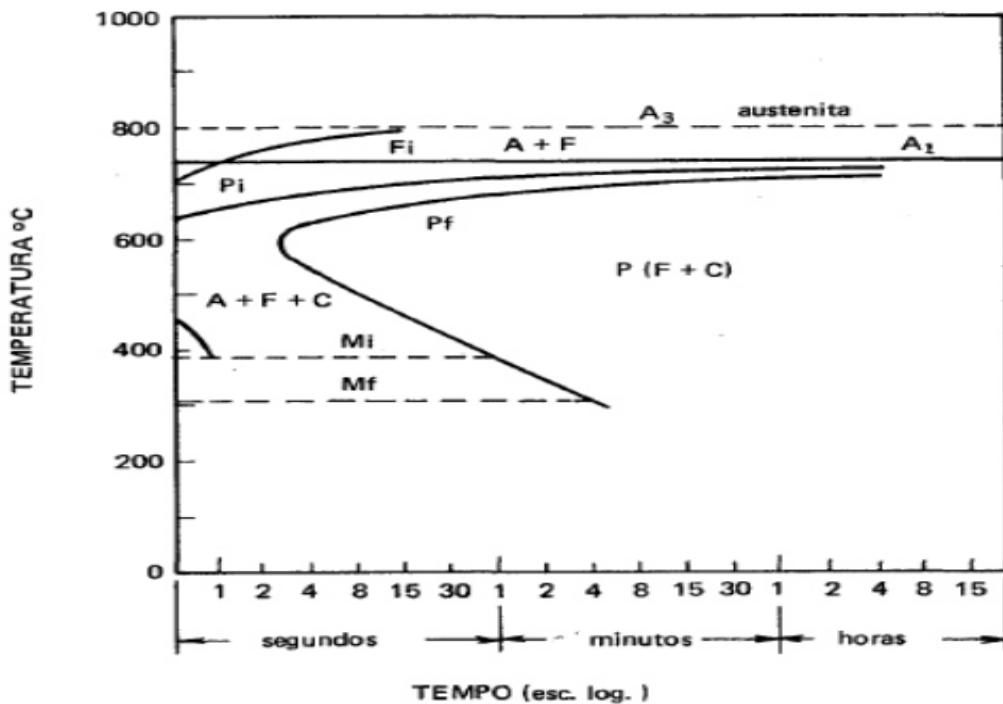
Fonte: Adaptado do Callister *et al.*, 2013.

A presença de elementos de liga, como: Cr, Ni, Mo e W, causam alterações significativas nesses diagramas, como variação nos valores da temperatura Ms e Mf e também um aumento ou diminuição do campo austenítico e bainítico.

Sendo que as zonas mais importantes do diagrama de equilíbrio Fe-C são a zona austenítica e as zonas críticas, localizadas entre as linhas de transformação A_1 , A_3 e A_{cm} . Que são linhas que delimitam a ocorrência das transformações da austenita no resfriamento e a reposição da austenita no aquecimento. E as linhas Ms e Mf, que são linhas que determinam o início e o fim da transformação adifusional da martensita.

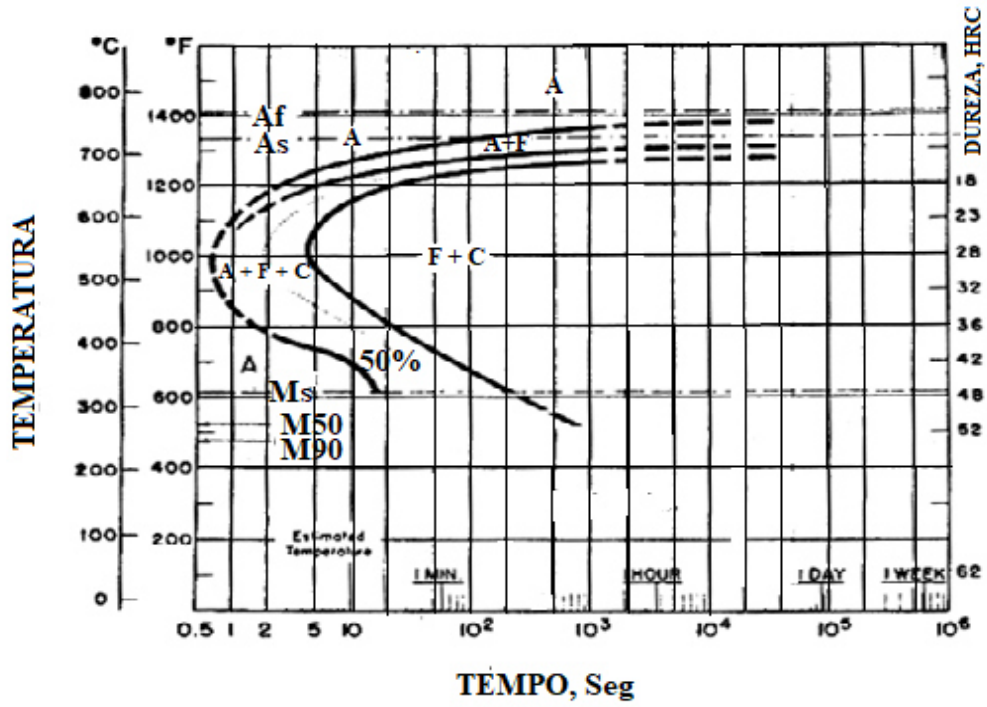
Sendo, esses diagramas, determinados experimentalmente para diferentes ligas. Nas figuras 10 e 11, temos aços carbonos comum, o que fica evidente no seu diagrama aproximação da curva para esquerda e assim explicando pouca ou não região para formação do microconstituente martensita. Já nas figuras 12 e 13, temos respectivamente aço ao cromo e aço ao níquel, cromo e molibdênio. Provando que os seus elementos de liga, deslocam a curva C do diagrama para a direita e assim permitindo a formação de novas microconstituente e de carbonetos. nos mostra as curvas características de cada aço carbono desse trabalho.

Figura 10. Diagrama TTT para aço SAE 1020.



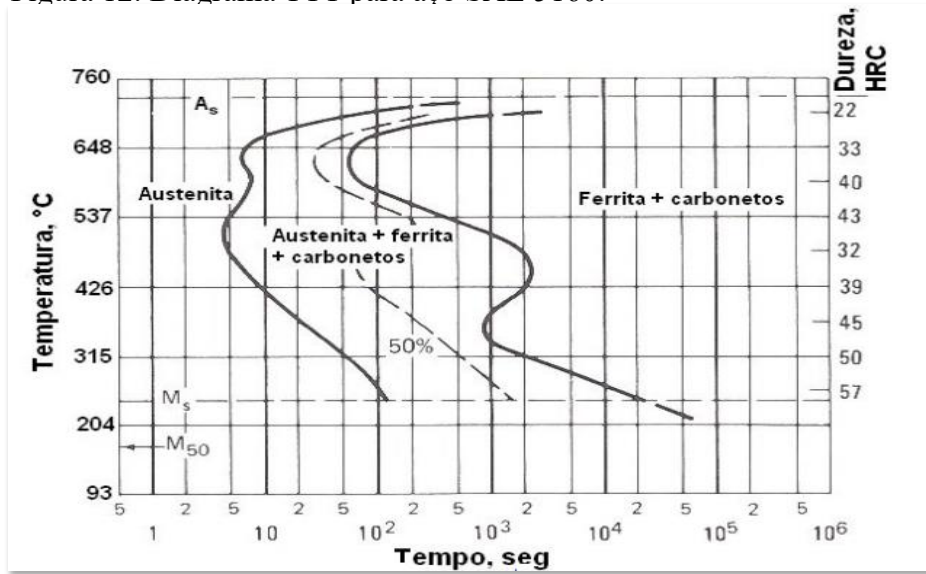
Fonte: Adaptado do Chiaverini, 2008.

Figura 11. Diagrama TTT para aço SAE 1045.



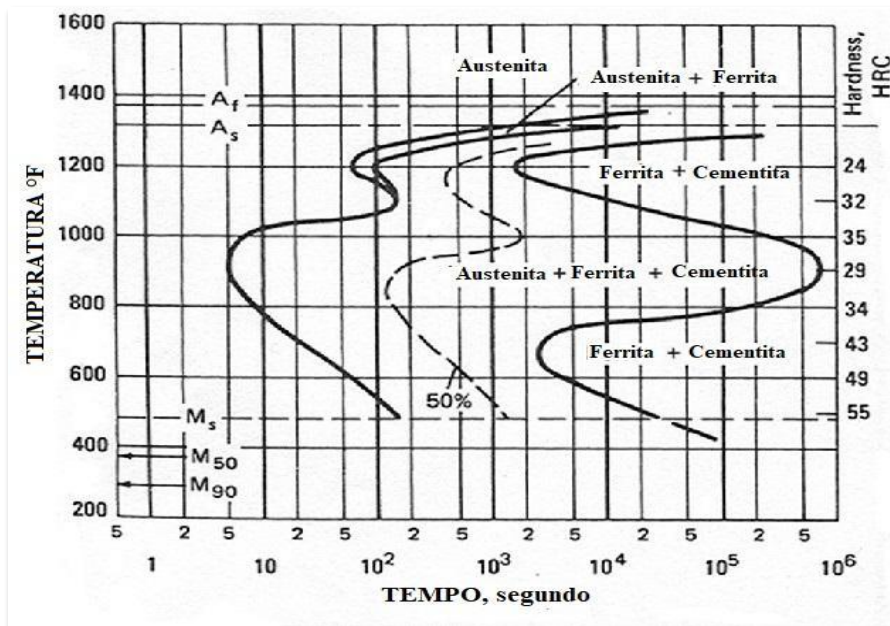
Fonte: Adaptado de Chandler, 1995.

Figura 12. Diagrama TTT para aço SAE 5160.



Fonte: Adaptado de Chandler, 1995.

Figura 13. Diagrama TTT para aço SAE 8620

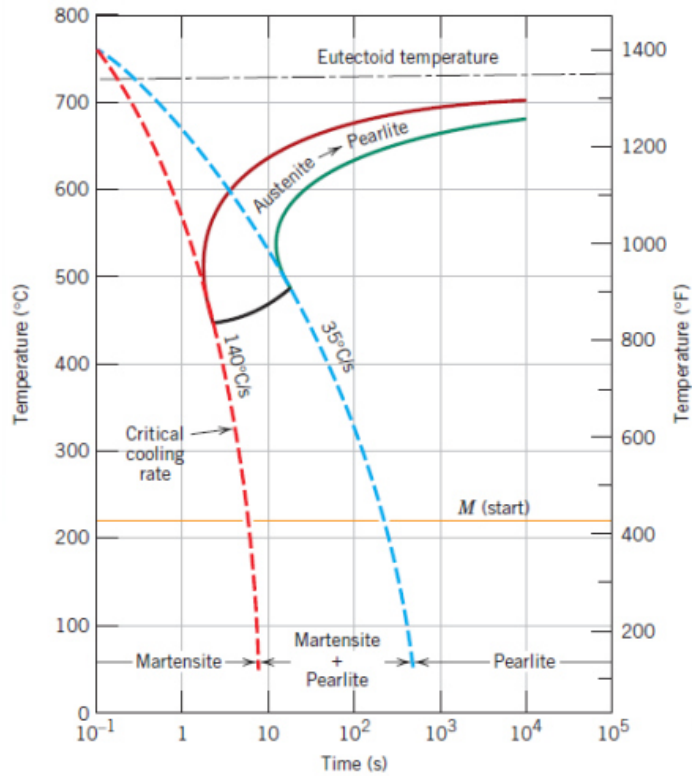


Fonte: Adaptado de Chandler, 1995

3.5. Diagrama CCT

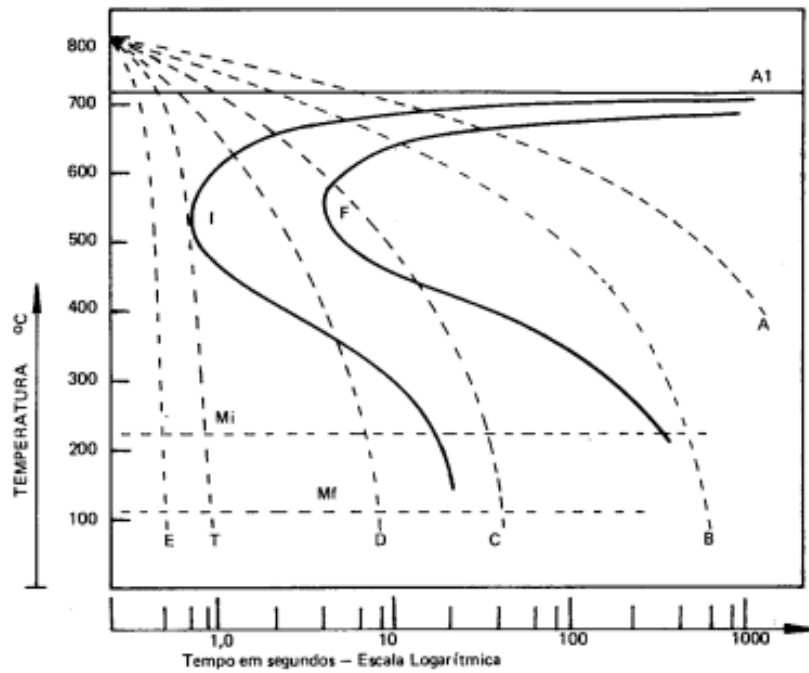
No resfriamento contínuo o tempo exigido para que uma reação tenha seu início e o seu término é retardado e as curvas são deslocadas para tempos mais longos e temperaturas menores. A transformação tem início após um período de tempo que corresponde à intersecção da curva de resfriamento com a curva de início da reação, e termina com o cruzamento da curva com o término da transformação. Sendo um diagrama de grande importância na engenharia, pelo simples fato de trabalhar com um resfriamento contínuo. O que torna favorável para eventuais tratamentos térmicos.

Figura 14. Diagrama de transformação por resfriamento contínuo para uma liga ferro - carbono.



Fonte: Callister *et al.*, 2013

Figura 14. Diagrama CCT para aços carbonos, em diferentes meios de resfriamento: (a) forno, (b) ar, (c) ar soprado, (d) óleo e (e) água.



Fonte: Adaptado de Chandler, 1995

3.5. Aço 1020

É um aço com uso bastante amplo e sem elementos de ligas. Tendo uma alta tenacidade e sendo favorável para receber tratamentos térmicos superficiais e assim aumentar sua dureza. As principais características desse aço são apresentadas na tabela 2.

Esse aço é aplicado em chapas automobilísticas, perfis estruturais, placas para produção de tubos, construção civil, porcas, longarinas, disco de rodas, eixos, peças para máquinas em geral, flandres e indústria de óleo e gás (BRANCO, 2007).

Tabela 2. Propriedade características do aço SAE 1020.

SAE 1020			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA			
%C	%Mn	%P (max)	%S (max)
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050
Tratamento Térmico		Têmpera; 750°C a 900°C	
		Revenimento; 100°C a 700°C	
		Normalização; 750°C a 950°C	
		Recozimento Pleno; 855°C a 900°C	
Temperabilidade		Ruim	
Forjabilidade		Boa	
Resistência mecânica		Ruim	
Tenacidade		Boa	
Soldabilidade		Boa	
Usinabilidade		Ruim	
Dureza		55/62	

Fonte: Adaptado da Handbook, 2004

3.6. Aço 1045

Aço com teor médio de carbono, que possui boa usinabilidade, resistência mecânica, soldabilidade e baixa resistência ao impacto. São ligas que podem ser tratadas termicamente para melhorar as suas propriedades, por exemplo, aumentar a dureza e resistência ao desgaste do material em determinado ponto (CALLISTER *et al.*, 2013).

É uma liga ferrosa que, quando fabricada, é submetida a um resfriamento lento, com objetivo de formar uma microestrutura constituída de ferrita e perlita, (Colpaert, 2008). Tem uma grande aplicabilidade industrial em eixos, chavetas, porcas, parafusos, hastes de sondagem, componentes estruturais e etc. (BURGUER *et al.*, 2009).

Tabela 3. Propriedade característica do aço SAE 1045

SAE 1045			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA			
%C	%Mn	%P (max)	%S (max)
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,030	0,050
Tratamento Térmico		Têmpera; 750°C a 900°C	
		Revenimento; 100°C a 700°C	
		Normalização; 750°C a 950°C	
		Recozimento Pleno; 790°C a 870°C	
Temperabilidade		Boa	
Forjabilidade		Boa	
Resistência mecânica		Boa	
Tenacidade		Boa	
Soldabilidade		Boa	
Usinabilidade		Boa	
Dureza (HRC)		50/55	

Fonte: Adaptado do Handbook, 2004.

3.7. Aço 5160

É um aço carbono que possui teores consideráveis de cromo e manganês em sua composição. Apresenta uma boa tenacidade, boa ductilidade e boa temperabilidade.

Geralmente este aço requer tratamentos térmicos, com o objetivo de se alcançar altos níveis de resistência mecânica e resistência à fadiga. Esse aço tem sido utilizado na fabricação de molas, barra de torção, parafusos, fixadores, lâminas de corte e pinos (KRISHNA *et al.*, 2013).

Tabela 4. Propriedade característica do aço SAE 5160

SAE 5160								
COMPOSIÇÃO QUÍMICA								
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Ni	%Cr	%Mo	%V
0,56 – 0,64	0,75 – 1,00	0,03	0,04	0,15–0,35	-	0,70 – 0,90	-	-
Tratamento Térmico				Têmpera; 750°C a 900°C				
				Revenimento; 100°C a 700°C				
				Normalização; 750°C a 950°C				
				Recozimento Pleno; 500°C a 900°C				
Temperabilidade				Boa				
Forjabilidade				Boa				
Resistência mecânica				Boa				
Tenacidade				Boa				
Soldabilidade				Ruim				
Usinabilidade				Boa				
Dureza				53/60				

Fonte: Adaptado do Handbook, 2004.

3.8. Aço 8620

Aço de média temperabilidade e boa resistência ao desgaste na superfície. Usado na indústria mecânica e automotiva, com intuito de melhorar a resistência para amassamentos e promover melhor polimento. Esses aços têm uma boa relação de resistência, entre a superfície e o seu núcleo, e assim se adequando melhor às possíveis aplicações.

Esse tipo de aço, é utilizado em elementos de máquinas, engrenagens de cambio e diferencial, coroas, pinhões, eixos, terminais, cremalheiras, fusos, buchas, balancins e peças mecânicas em geral e outras aplicações de engenharia (UNTERWEISER; BOYER; KUBBS, 1982).

Tabela 5. Propriedade característica do aço SAE 8620

SAE 8620								
COMPOSIÇÃO QUÍMICA								
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Ni	%Cr	%Mo	%V
0,18 – 0,23	0,70 – 0,90	0,03	0,04	0,15 – 0,35	0,40 – 0,70	0,40 – 0,60	0,15 – 0,25	-
Tratamento Térmico				Têmpera; 750°C a 900°C				
				Revenimento; 100°C a 700°C				
				Normalização; 750°C a 950°C				
				Recozimento Pleno; 500°C a 900°C				
Temperabilidade				Boa				
Forjabilidade				Boa				
Resistência mecânica				Moderada				
Tenacidade				Boa				
Soldabilidade				Boa				
Usinabilidade				Boa				
Dureza				55/62				

Fonte: Adaptado da Handbook, 2004.

3.9. Caracterização microestrutural

Tendo em vista a importância da microestrutura no presente trabalho, o modo mais utilizado na caracterização e quantificação das fases, é a técnica de ataque químico. Essa técnica consiste na corrosão controlada, através da diferença de potencial eletroquímico em áreas de superfície com heterogeneidades químicas ou físicas (FERGUSON, 1998).

O reagente químico mais utilizado nos aços para essa técnica é o Nital, que nada mais é uma solução de ácido nítrico (HNO_3) e álcool etílico.

No presente trabalho, o reagente Nital evidenciou áreas claras para fases não corroídas, como por exemplo: ferrita e austenita retida. E áreas escuras para fases que sofreram corrosão. Como, martensita, bainita e perlita.

3.9.1. Microestrutura

A relação entre a composição química e a temperatura a que fica submetido o aço, pode apresentar diferentes microestruturas. E que está amplamente explicativo no que chamamos de diagrama de fase. (TOTTEN, 2007).

3.9.1.1 Austenita

Temos na austenita (fase γ), uma fase com estrutura CFC (corpo de face centrada), que proporciona um aumento da solubilidade do carbono em sua estrutura com o aumento da temperatura. Temos nesse constituinte uma solução intersticial de carbono, e que se encontra estável na temperatura de 727°C (SANTOS, 2006). No resfriamento de um aço que esteja no campo austenítico e que depende da taxa de resfriamento, devemos obter as seguintes fases: ferrita pró-eutetóide, bainita, martensita e até o constituinte perlita. E que está representado na figura 14 (CHIAVERINI, 2008).

Figura 14. Processo do comportamento da austenita sobre a taxa de resfriamento.



Fonte: Próprio auto.

3.9.1.2. Ferrita

A ferrita é uma solução sólida intersticial de carbono no ferro α com estrutura CCC. É um constituinte microestrutural de baixa dureza, alta ductilidade, baixa resistência à tração, excelente resistência ao choque e elevado alongamento. Apresentando respostas a um campo magnético externo até a temperatura de 770°C (temperatura Curie) (SANTOS, 2006).

Sua formação ocorre pelo processo de difusão e sua nucleação ocorre preferencialmente nos contornos de grão da austenita (ferrita alotriomórfica).

Com o aumento da taxa de resfriamento a ferrita passa a nuclear no interior do grão austenítico (ferrita intragranular), contendo em solução traços de carbono e que está bem demonstrativo na figura 15 (CHENG; WAN; WU, 2010).

Figura 15. Ferrita intragranular (1) e ferrita alotriomórfica (2)

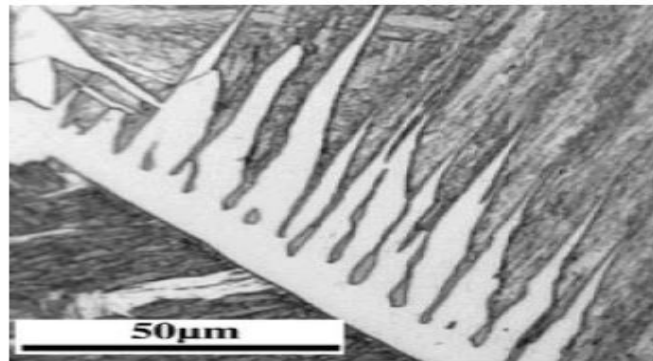


Fonte: Thewlis, 2004

3.9.1.2.1. Ferrita de Widmanstätten

A ferrita de Widmanstätten é composta por placas laterais de ferrita, que precipitam e crescem através de um contorno de grão da austenita ou ferrita alotriomórfica ou, ainda, de inclusões. Um maior tamanho de grão da austenita, teores intermediários de carbono (entre 0.2% e 0.4%) e, principalmente, um super-resfriamento em relação à temperatura A_3 favorecem o aparecimento dessa estrutura. Formam-se grãos relativamente grosseiros, com pequenas diferenças de orientação, o que pode ser apreciado na figura 19. (RODRIGO, 2011; BHADESHIA, 1999).

Figura 16. Micrografia óptica de Widmanstätten em placas laterais



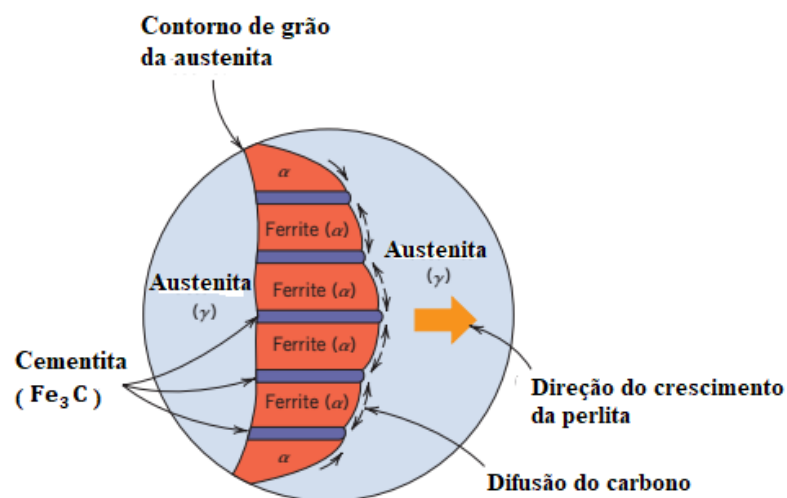
Fonte: Cheng, Wang e Wu, 2010.

3.9.1.3. Perlita

É um composto formado por duas fases, em temperaturas menores que 727°C , que apresenta uma estrutura não estável e com uma microestrutura de plaquetas alternadas de cementita e ferrita (Figura 17). Esse microconstituente tem uma fase rica em carbono, denominada de cementita. Sendo um carboneto de ferro de intrínseca relação com sua nucleação e crescimento em determinadas temperaturas e que determinadas mudanças no seu reticulado cristalino, permite movimento de átomos por difusão (Figura 20). (BHADESHIA, 1992)

Sendo tal morfologia, formada por camadas, que podem ser grosseiras ou finas, dependendo da faixa de temperatura e das taxas de difusão dos átomos de carbono (Figura 19) (TARIN; PEREZ, 2004).

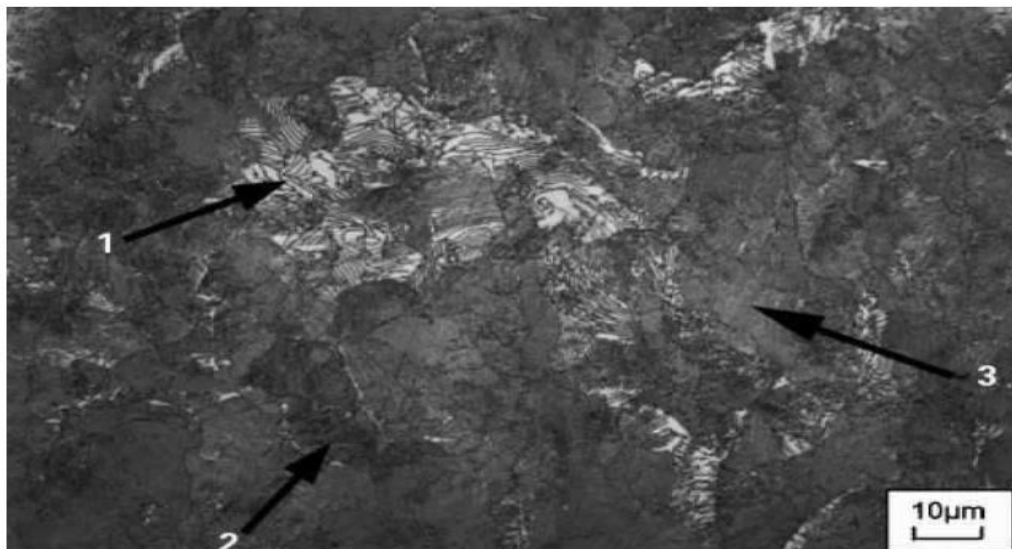
Figura 17. Representação esquemática do nódulo de perlita a partir da austenita



Fonte: Callister *et al.*, 2013

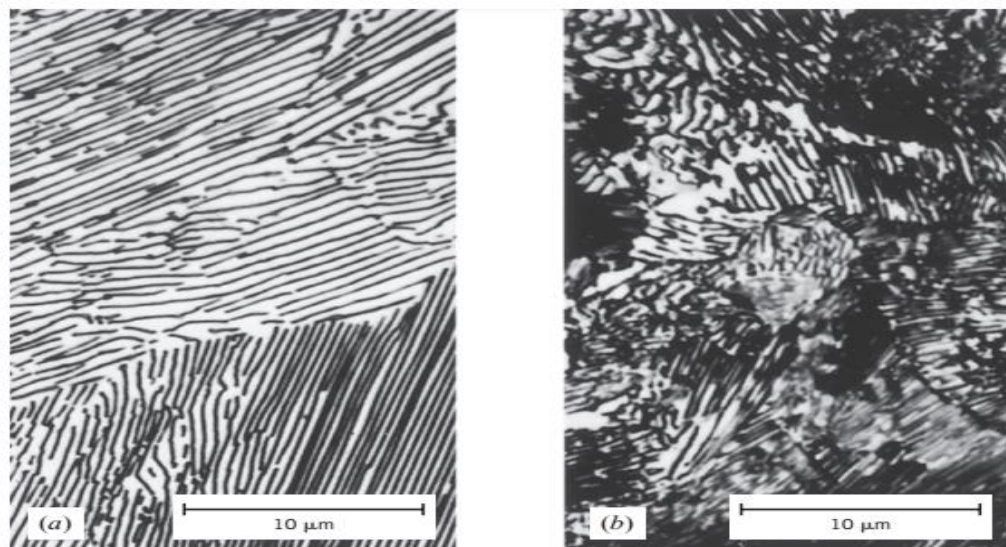
E no caso de transformações em altas temperaturas, teremos nódulos com lamelas de ferrita e cementita que podem tender a coalescer e degenerar (perlita grosseira). Tendo também, lamelas agregadas de ferrita e carbonetos. E à medida que a temperatura de transformação diminui, as lamelas tornam-se progressivamente mais finas (perlita fina). E de maneira alternativa, podemos ter distorções entre as lamelas e assim, promover perlita não lamelar (troostita) e de baixa resolução microscópica. Sendo bem representado na figura 18 e 19 (LESSA, 2011).

Figura 18. Lamelas alternadas de ferrita e cementita (1), agregados de ferrita e carbonetos (2) e perlita não-lamelar (3)



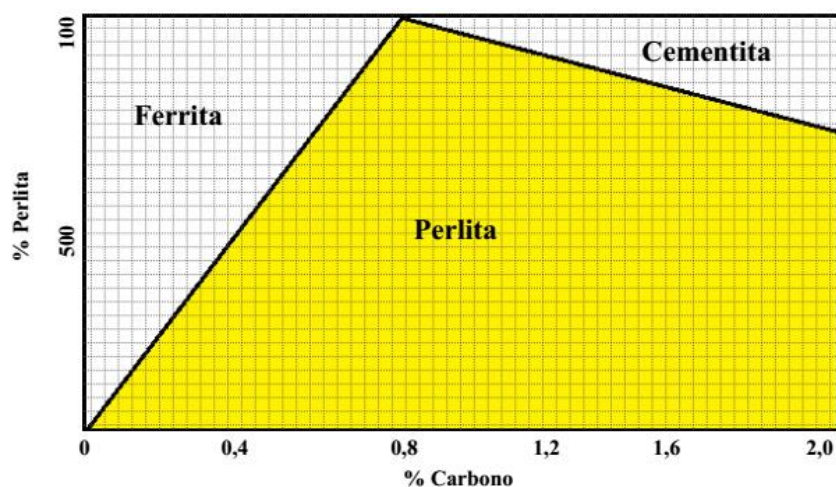
Fonte: Thewlis, 2004

Figura 19. Fotomicrografias de perlita fina (a) e perlita grosseira (b)



Fonte: Callister *et al.*, 2013.

Figura 20. Diagrama da porcentagem dos constituintes, quando resfriado lentamente



Fonte: Adaptado do Colpaert *et al.*, 2008.

3.9.1.5. Cementita

Cementita é um composto químico de fórmula química Fe_3C , com estrutura ortorrômbica, de alta dureza e frágil. A sua formação ocorre quando temos uma supersaturação de carbono na austenita, promovendo uma expulsão do carbono e uma subsequente ligação do carbono com o ferro e assim resultando na formação do carboneto de ferro (cementita).

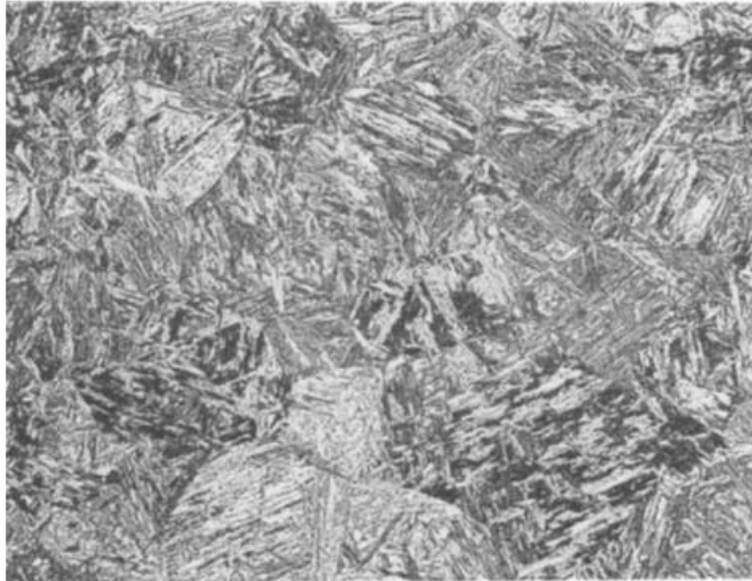
3.9.1.6. Martensita

A martensita é uma estrutura monofásica e metaestável que se forma durante condições de não equilíbrio. Diferentemente de outras fases isotérmicas, a martensita não aparece no diagrama de fases. O mecanismo da transformação martensítica é um processo adifusional, que ocorre quando a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para evitar a difusão do carbono, visto que qualquer difusão que porventura venha a ocorrer resultará na formação da ferrita e cementita. Temos nesse processo, a austenita, CFC, se transformando em martensita com estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) (THEWLIS, 2004)

As martensitas dos aços-carbonos podem ser formar a partir de duas formas, sendo uma martensita na forma de ripa, figura 26 e a martensita na forma lenticular, figura 27. O fator principal que controla as frações volumétricas dessas duas formas é a temperatura de transformação. Uma maior concentração de martensita lenticular é favorecida por temperaturas de transformação mais baixas, enquanto a forma de ripa é favorecida por temperaturas mais altas.

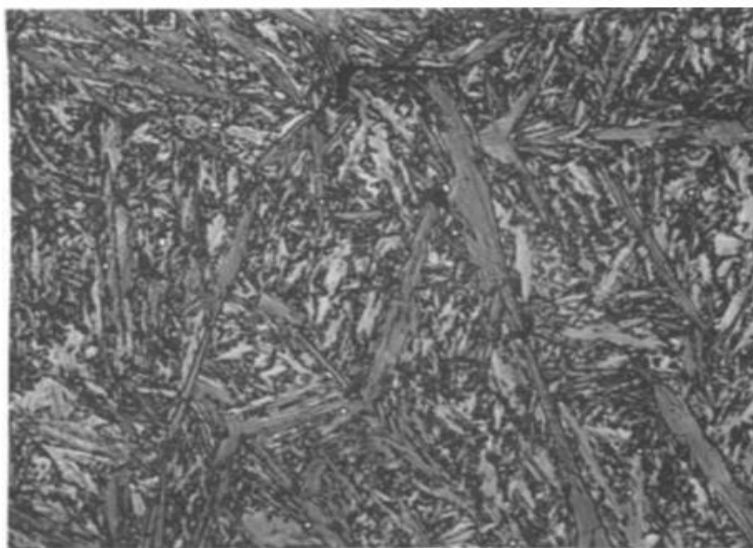
Maiores teores de carbono (1,0 - 1,4%C) tendem a apresentar grandes frações volumétricas da componente lenticular, teores mais baixos (0,2 - 0,6%C) favorecem a formação em ripas e entre 0,6 e 1% há uma mistura de lenticular e ripas, sendo exemplificado no diagrama da figura 28 (KRAUSS, 1990; CALLISTER *et al.*, 2013).

Figura 26. Microestrutura martensita em forma de ripas.



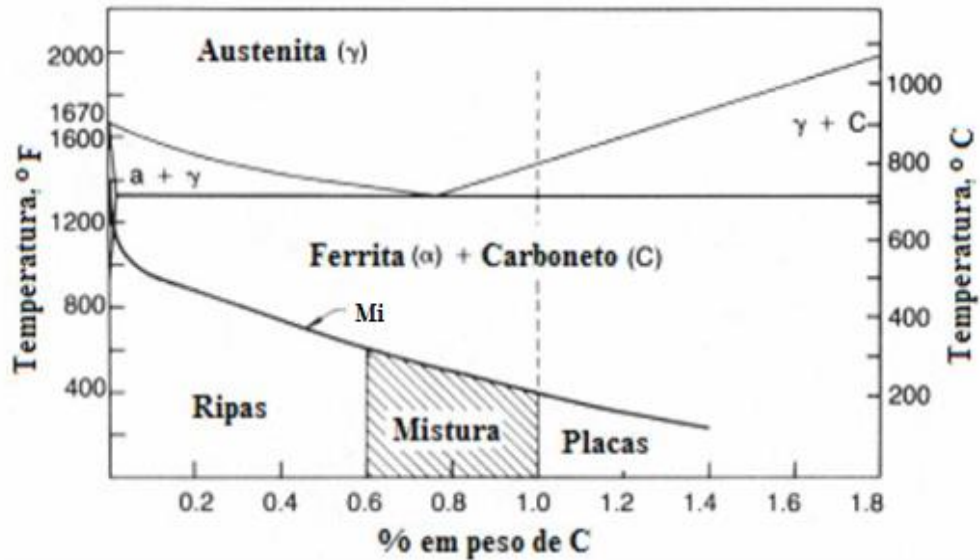
Fonte: Microestrutura de uma martensita de ripa típica. 4% picral + HCl. 200x. Bramfitt, 1997.

Figura 27. Microestrutura martensita em forma de lenticular.



Fonte: Microestrutura de uma martensita de placa típica. 4% picral + HCl. 200x. Bramfitt, 1997.

Figura 28. Diagrama Fe-C com as morfologias da martensita em função do percentual de carbono.

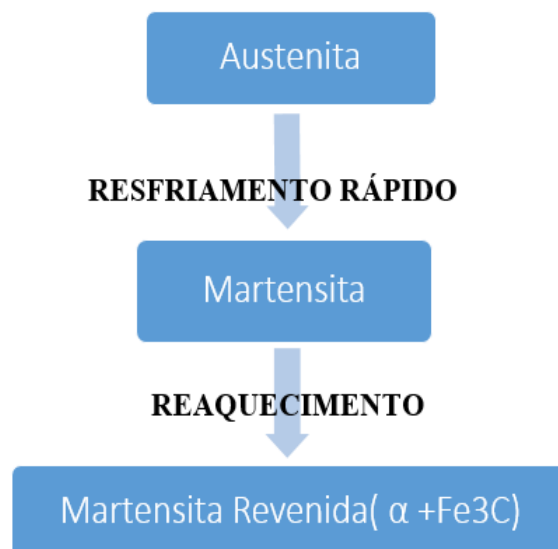


Fonte: Adaptado de Krauss e Grossmann, 1980.

3.9.1.6.1. Martensita revenida (martensita + carbonetos)

A martensita obtida após o processo de tempera, tem, como objetivo aumentar a ductilidade, a tenacidade da martensita e aliviar as tensões. É realizado no aço carbono pelo tratamento térmico de revenimento (Figura 31).

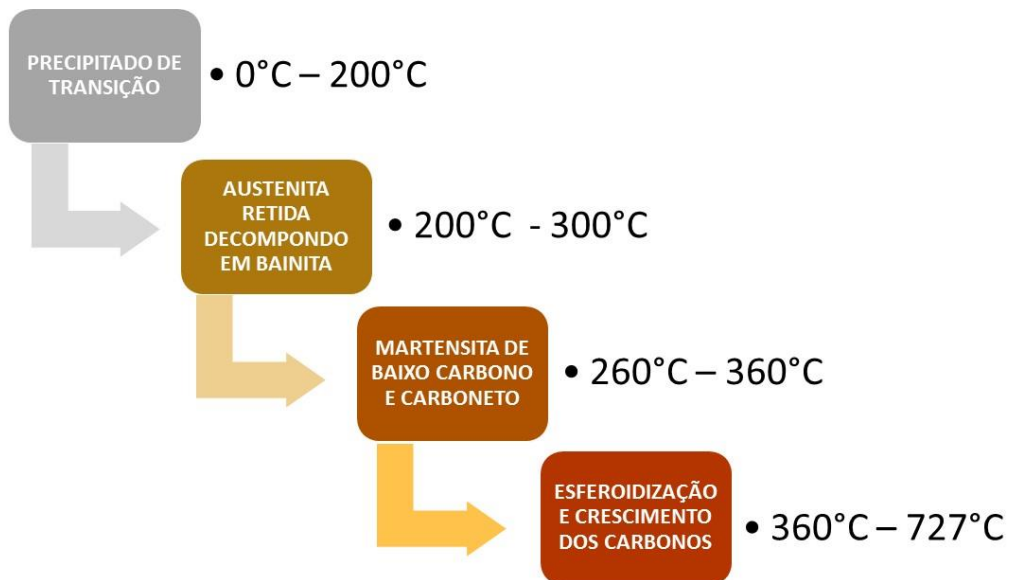
Figura 31. Transformação da austenita em martensita revenida.



Fonte: Próprio autor.

Nesse tratamento, a martensita com estrutura TCC monofásica supersaturada com carbono se transforma nas fases estáveis ferrita e cementita, (figura 32).

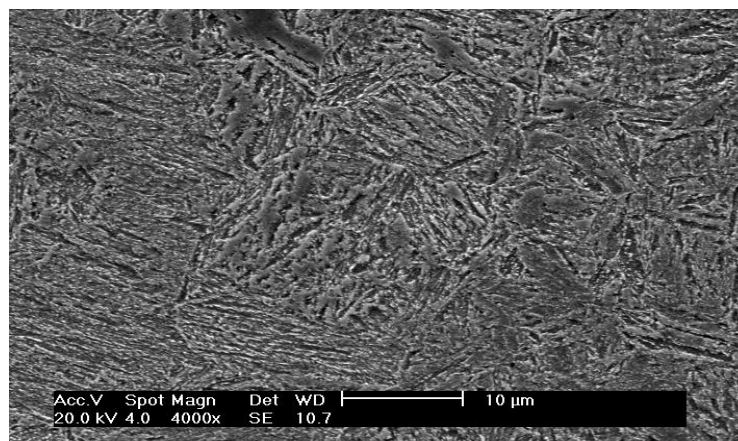
Figura 32. Processo da martensita revenida.



Fonte: Próprio autor.

Em que sua representação microestrutura conhecida por martensita revenida será constituída em partículas de cementita extremamente pequena e uniformemente distribuída dentro da uma matriz de ferrítica. O aumento das partículas de cementita pode diminuir na área de contorno e assim aumentando a ductilidade do material (Figura 33).

Figura 33. Martensita revenida 4000x.



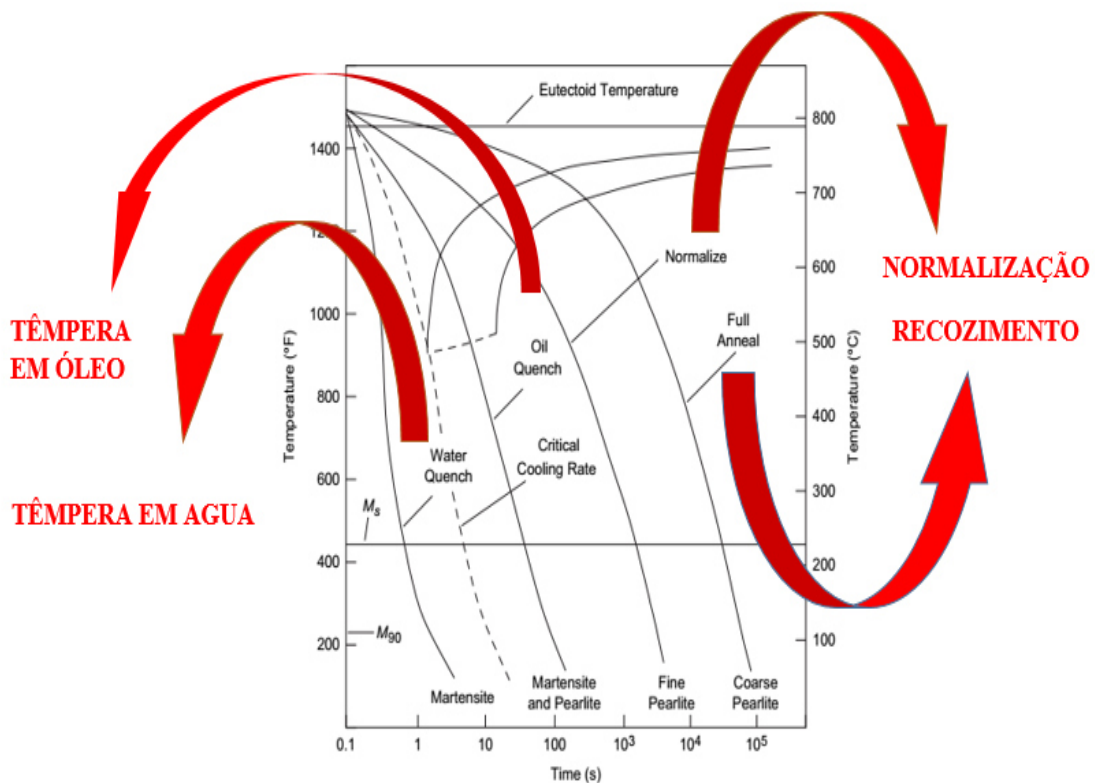
Fonte: Silva *et al.*, 2009.

3.10. Tratamento térmico

Tratamento térmico é um processo de aquecimento e resfriamento de ligas metálicas ferrosas e não ferrosas, em condições controladas de temperatura, atmosfera, tempo e velocidade de resfriamento. O principal objetivo desses tratamentos é causar mudanças propositalmente em sua microestrutura e conseqüentemente em suas propriedades (TOTTEN, 2007; STEIN *et al.*, 2005; VAN VLACK, 1984; COSTA *et al.*, 2010).

Nesse processo o material é aquecido em uma determinada temperatura pré-determinada e em seguida é imposta uma taxa de resfriamento ao aço. Essa taxa é preponderante para caracterizar o tratamento térmico realizado (Figura 34) (NOVIKOV, 1994; ANAZAWA, 2007).

Figura 34. Diagrama de transformação tempo e temperatura, na condição de alguns tratamentos térmicos.

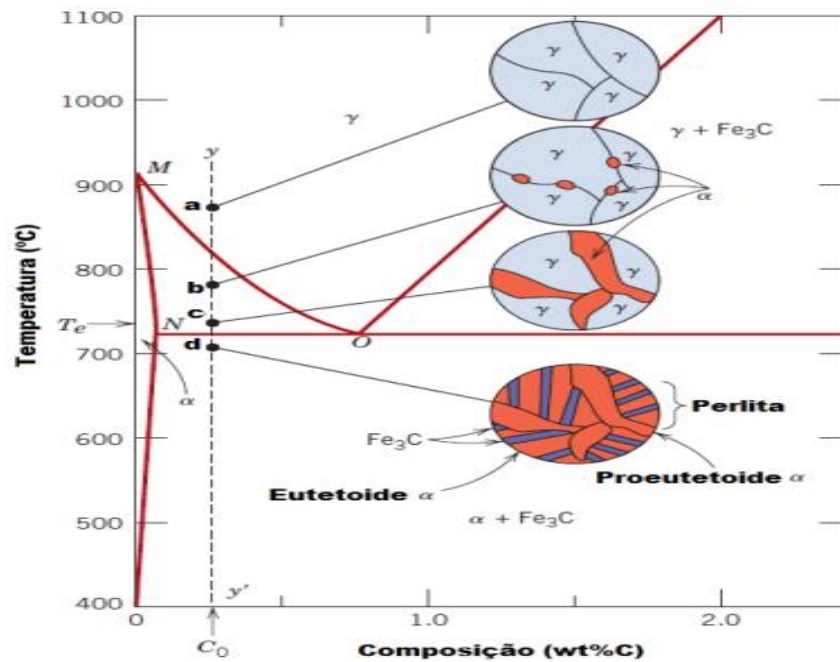


Fonte: Reed-Hill e Abbaschian 1991.

3.10.1. FATORES QUE AFETAM OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Realizando as operações de tratamentos térmicos, temos na taxa de aquecimento, o procedimento essencial para que ocorra as potenciais mudanças na microestruturas do material. Sendo determinada por meio de diagramas de equilíbrio de cada liga ferrosa ou não ferrosa (NOVIKOV, 1994).

Figura 37. Transformação de um aço baixo carbono com resfriamento lento.



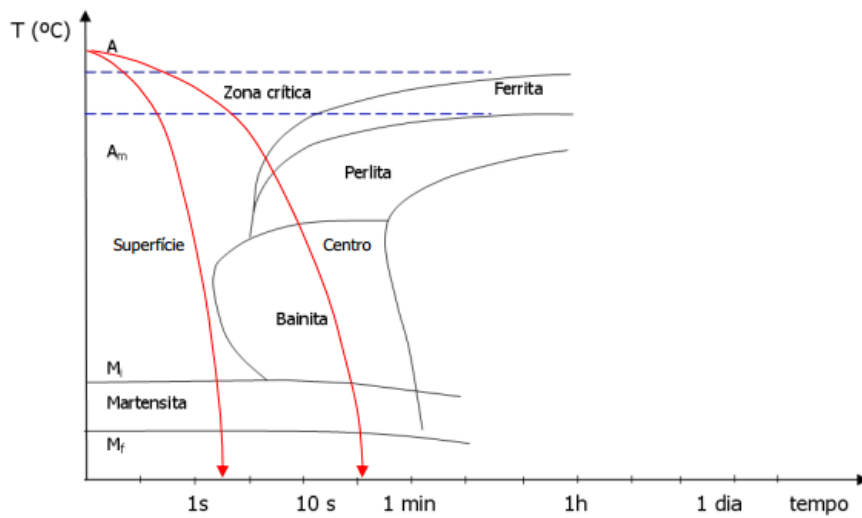
Fonte: Callister *et al.*, 2013.

3.10.2. Têmpera

Tratamento que consiste em aquecer o aço acima da zona crítica, numa faixa delimitada de até 50°C da linha da zona crítica e em seguida resfriá-lo bruscamente, por meios de resfriamentos, como: água, óleo e salmoura. Permitindo a transformação da austenita em martensita e assim, evitando a formação de ferrita, perlita e bainita. O objetivo desse tratamento é formar martensita na estrutura microestrutural do aço e conseqüentemente aumentar a dureza do aço, melhorar o rendimento e a ductilidade, melhorar a homogeneização e eliminar a fragilidade (CHIAVERINI, 2008; CALLISTER *et al.*, 2013).

Em relação ao tempo de têmpera, se faz necessário o mínimo. Observando na figura 38 é possível analisar que o resfriamento rápido faz com que os átomos de carbono fiquem presos no interior da austenita, o que produz deformação no retículo da ferrita.(KRAUSS, 2000; SANTOS, 2006).

Figura 38. Representação do tratamento de têmpera de um aço carbono.



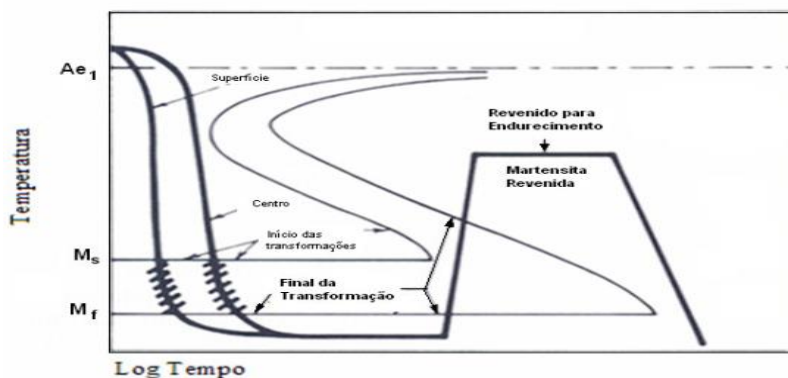
Fonte: Tschiptschin, Oliveira e Pinedo, 2007.

3.10.3. Revenimento

Revenimento é um tratamento térmico complementar da têmpera e que ocorre por estágio. E que tem como objetivo provocar melhorias nas propriedades do aço que sofreu o tratamento de têmpera, tais como, diminuição da dureza e aumento da tenacidade.

No revenimento, temos uma grande dependência com a temperatura, onde a figura 40 mostra seu comportamento no processo térmico, e que nos estágios promove possíveis modificações, como: a transformação da martensita tetragonal para martensita cúbica, a segregação de carbonos, precipitação de carbeto, decomposição da austenita retida, recuperação da matriz ferrítica e a recristalização da matriz ferrítica (SMITH, 1993).

Figura 40. Representação do tratamento de revenido de um aço carbono.

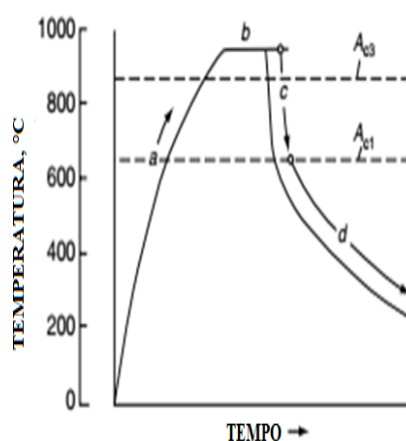


Fonte: Smith, 1993

3.10.4. Normalização

É um processo de tratamento térmico no qual consiste em austenitizar o material nas temperaturas de 30°C a 80°C acima da temperatura da zona crítica. Nos aços hipoeutetóides é acima da temperatura de A_3 . Esse tratamento é feito com um arrefecimento lento e ao ar. Objetivando um reduzir os grãos, com uma estrutura de ferrita-perlita de grão fino, uniforme e bem distribuído (CHIAVERINI, 2008). A Figura 41 mostra o ciclo térmico de um processo de normalização e nos aços hipoeutetóides, teremos primeiramente uma precipitação de ferrita, que está intimamente relacionada com a taxa de arrefecimento. Numa condição mínima de arrefecimento, teremos um aumento precipitado de ferrita ao longo dos limites de grãos de austenita.

Figura 41. Regime de tempo-temperatura no tratamento de normalização: (a) Aquecimento, (b) austenitização, (c) arrefecimento ao ar, (d) arrefecimento ao ar ou ao forno.



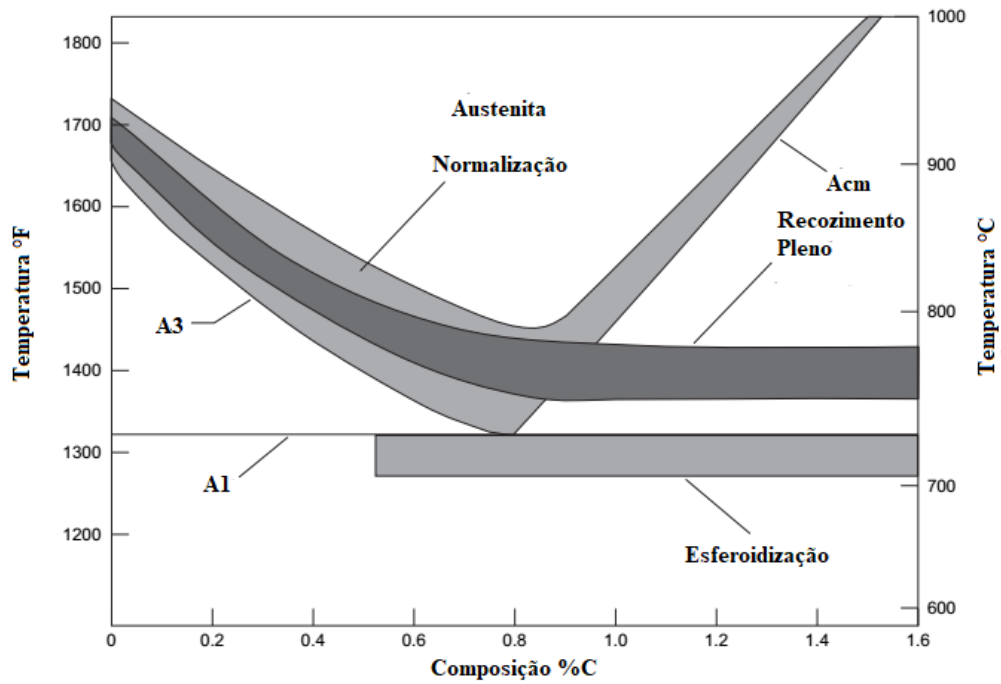
Fonte: Spurand e Stoferle, 1987

3.10.5. Reozimento pleno

É um tratamento térmico em que um metal ou liga é aquecido a uma certa temperatura, mantido por um certo período de tempo e em seguida resfriado lentamente. Em aços, o tratamento térmico ocorre numa faixa de temperatura próxima a linha da zona crítica (austenitização total) e um resfriamento moderado dentro do forno. Sendo bem representado na figura 44. O reozimento é usado para reduzir a dureza, obter uma microestrutura relativamente estável e reduzir o tamanho do grão.

Para aços hipoeutetóides, o recozimento pleno consiste aquecimento a 10 a 40 ° C acima da temperatura A_3 , e em que no caso por resfriamento muito lento. Como temos as taxas de resfriamento muito lentas, a microestrutura resultante consiste em ferrita grossa ou ferrita grossa mais perlita, dependendo do carbono e da liga do aço (Handbook, 2004).

Figura 44. Região processual do tratamento térmico de recozimento pleno.



Fonte: Guy, 1959.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Preparação dos corpos de provas

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram retirados de barras de aço dos respectivos aços, ABNT 1020, 1045, 5160 e 8620. As amostras de estudo foram cortadas em uma dimensão aproximadamente 25 milímetros de comprimento e diâmetro de 0,75 milímetros, previamente definida e tal procedimento foi realizado em uma máquina de corte. Por fim, foi obtido de cada barra de aço citado anteriormente 5 amostras. Na figura 46 temos as amostras resultantes.

Figura 46. Amostras iniciais.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida as amostras foram identificadas por nomenclaturas coerentes com os procedimentos propostos e assim marcadas em concordância com a categoria: fornecido (sem tratamento térmico) e com tratamento térmico de normalização, recozimento pleno, revenimento e têmpera em óleo.

Na tabela 6 encontra-se a denominação das amostras e seus respectivos tratamentos térmicos.

Tabela 6. Nomenclatura das amostras.

IDENTIFICAÇÃO	CATEGORIA
1020, 1045, 5160 e 8620.	FORNECIDO
1020 T, 1045 T, 5160 T e 8620 T.	TÊMPERA EM OLEO
1020 N, 1045 N, 5160 N e 8620 N.	NORMALIZAÇÃO
1020 R, 1045 R, 5160 R e 8620 R.	RECOZIMENTO
1020 RE, 1045 RE, 5160 RE e 8620 RE.	REVENIMENTO

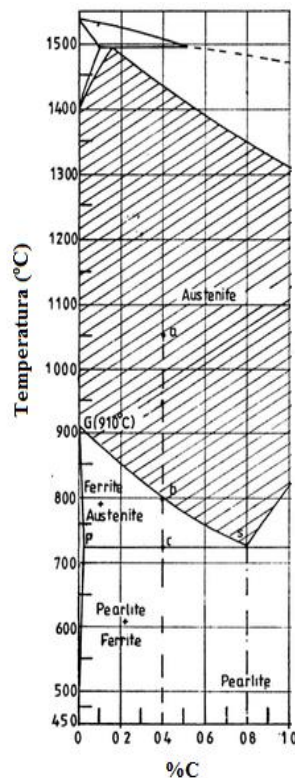
Fonte: Próprio autor.

4.2. Tratamentos térmicos aplicados

Nos tratamentos térmicos do presente trabalho, exceto o revenimento, promoveu-se uma temperatura de austenitização de 850°C com um tempo de 25 minutos.

Com o intuito de permitir a suficiente homogeneização da estrutura e a sua total transformação de fase em austenita. (TOMITA; OKABAYASHI, 1983). Sendo representado e embasado pelo diagrama de Fe-C, da figura 47.

Figura 47. Diagrama Fe-C representando o resfriamento do aço a partir da temperatura de austenitização à 850°C.



Fonte: Adaptado de Hudok, 1990.

4.2.1. Preparação das amostras para tratamento térmico

Para as amostras que participaram dos tratamentos térmicos foi feito com que cada peça, que participou dos tratamentos térmicos, sofresse um furo radial. Tendo esse furo, um suporte prático, por onde um arame de aço passaria por dentro de cada furo, permitindo que, um conjunto de aços em estudo, entrasse no interior do forno em condição favorável e que não permitisse o contato entre os corpos de prova. Facilitando o manuseio das peças dentro do forno e a utilização do forno. A Figura 49 apresenta as amostras com este suporte.

Figura 49. Amostra com suporte para os tratamentos térmicos.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, participaram de um tratamento térmico em um forno, figura 50. A temperatura de tratamento térmico das amostras foi estabelecida em 850°C conforme uma análise de trabalhos científicos e pelos diagramas de equilíbrio das ligas em estudo.

O tempo de aquecimento em acordo com a dimensão da peça e um tempo de encharque de 25 minutos, embasado por uma literatura científica e especializada.

Figura 50. Forno



Fonte: Próprio autor.

Decorrido o tempo de aquecimento e de encharque, as peças sofreram um resfriamento de acordo com os tratamentos térmicos.

4.2.2. Têmpera

Na realização deste tratamento foram selecionadas as amostras 1020 T, 1045 T, 5160 T, 8620 T e cada uma delas foi aquecida numa temperatura de 850°C em uma taxa de aquecimento de 20°C/s e cada amostra sofreu um tempo de encharque de 25 minutos.

Esse tempo está relacionado com a proporção dimensional das amostras e das características específicas de cada material. No fim do tratamento as amostras foram retiradas do forno e imediatamente resfriadas em um reservatório com óleo industrial em uma temperatura de aproximadamente de 24°C, figura 51 e com agitação constante por um tempo de aproximadamente um minuto.

4.2.3. Revenimento

Na realização deste tratamento foram selecionadas as amostras 1020 RE, 1045 RE, 5160 RE, 8620 RE e cada uma delas sofreu um tratamento de têmpera semelhantes ao descrito no tópico 4.2.2 (tópico de têmpera), após este tratamento as amostras sofreram o tratamento de revenimento em uma temperatura de 600°C por um período de 120 minutos.

Após o revenimento as amostras foram resfriadas diretamente ao ar.

4.2.4. Normalização

Na realização deste tratamento foram selecionadas as amostras 1020 N, 1045 N, 5160N, 8620 N, cada uma delas foi aquecida a uma temperatura de 850°C em uma taxa de aquecimento de 20°C/s e cada amostra sofreu um tempo de encharque de 25 minutos.

No fim do aquecimento as amostras foram retiradas do forno e colocadas para serem resfriadas ao ar ambiente, por um certo tempo até chegar na condição de temperatura de 25°C.

4.2.5. Recozimento pleno

Na realização deste tratamento foram selecionadas as amostras 1020 R, 1045 R, 5160 R, 8620 R, cada uma delas foi aquecida a uma temperatura de 850°C em uma taxa de aquecimento de 25°C/s e cada amostra sofreu um tempo de encharque de 25 minutos. Essas amostras foram resfriadas no interior do forno, porém o mesmo permaneceu desligado após o ensaio. O resfriamento terminou quando as amostras atingiram a temperatura de 25°C.

4.3. Caracterização metalográfica

Realizando inicialmente a preparação metalográfica, as amostras foram levadas para uma lixadeira rotativa, e através de um processo manual e com a sequência correta das granulometrias das lixas, chegamos no processo de polimento metalográfico das amostras.

Por fim, todas as amostras foram atacadas em uma capela de ataque químico, com nital 2%, com o intuito de se observar os contornos de grão e as diferentes fases de suas respectivas microestruturas. As amostras ficaram imersas nesse reagente por uma faixa de tempo de 10 a 120 segundos dependendo da amostra e do tratamento aplicado. Sendo este reagente considerado na leitura o mais favorável para permitir a quantificação das diferentes fases, presente nos aços desse trabalho. Tendo como consideração válida, a composição química do material ou constituição microestrutural. Podendo responder microscopicamente pelas imagens de maneira distinta, dependendo do grão atacado ou por uma diferente orientação cristalográfica da estrutura (ASM, 2004).

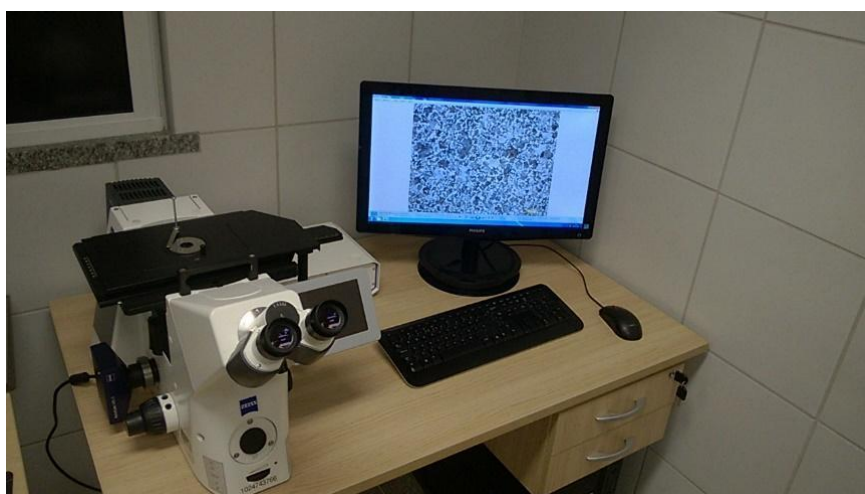
4.3.1. Microscopia ótica

Após o ataque químico, todas as amostras (com e sem tratamento térmico) foram analisadas utilizando um microscópio ótico de luz visível e de um sistema de lentes para a aquisição das imagens em um microscópio óptico.

Tendo o software Action Vision para se visualizar e realizar ajustes de softwares em imagem, quando necessário.

Na figura 55 temos o microscópio utilizado neste estudo. O objetivo deste procedimento é obter imagens da microestrutura das amostras e, posteriormente, utilizar tais imagens para quantificar as fases presentes nas amostras.

Figura 55. Microscópio óptico Zeiss acoplado ao software Action Vision.

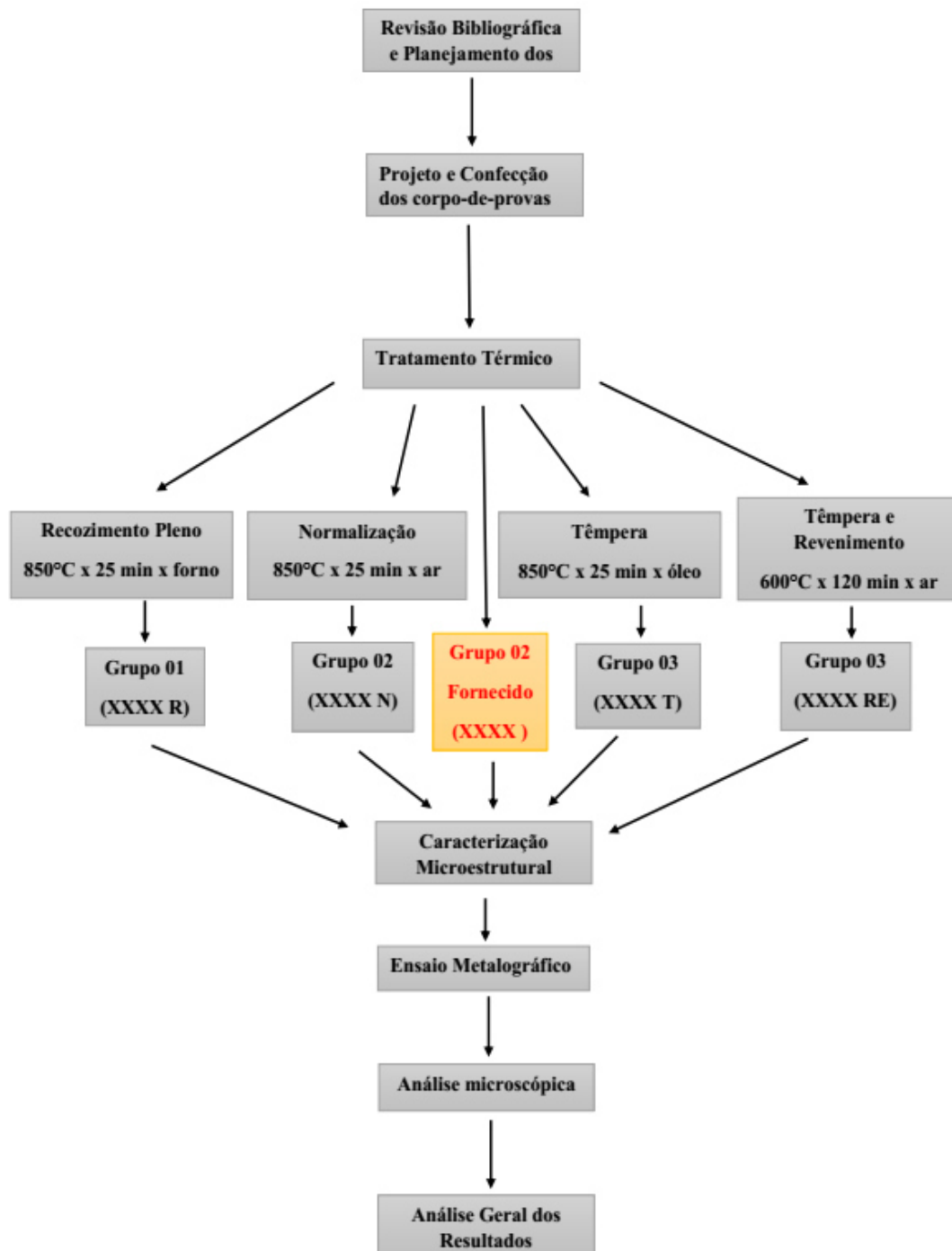


Fonte: Próprio autor.

4.4. Fluxograma do trabalho

Em seguida, temos um fluxograma que representa todos os procedimentos feitos no presente trabalho, de forma clara e autoexplicativo, figura 56.

Figura 56. Fluxograma das etapas para realização do trabalho.



Fonte: Próprio autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

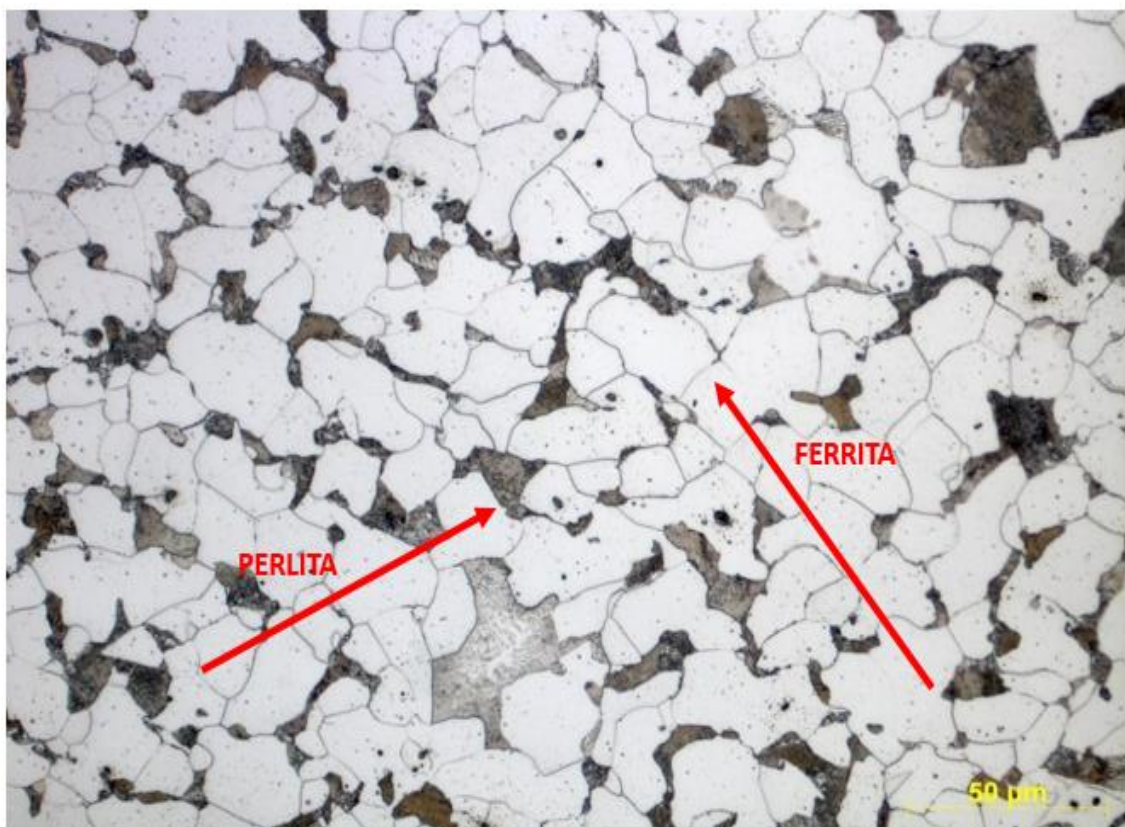
5.1. Análise micrográfica

5.1.1. Micrografia das amostras padrões

1020 CR

Na figura 57 temos apresentado a micrografia da amostra 1020 CR. Um aço SAE 1020, com baixo teor de carbono. O que proporciona uma matriz ferrítica e algumas regiões do microconstituente perlita, como foi sinalizado na figura.

Figura 57. Micrografia da amostra 1020, como recebido e atacado com nital 2%. Aumento de 500x.

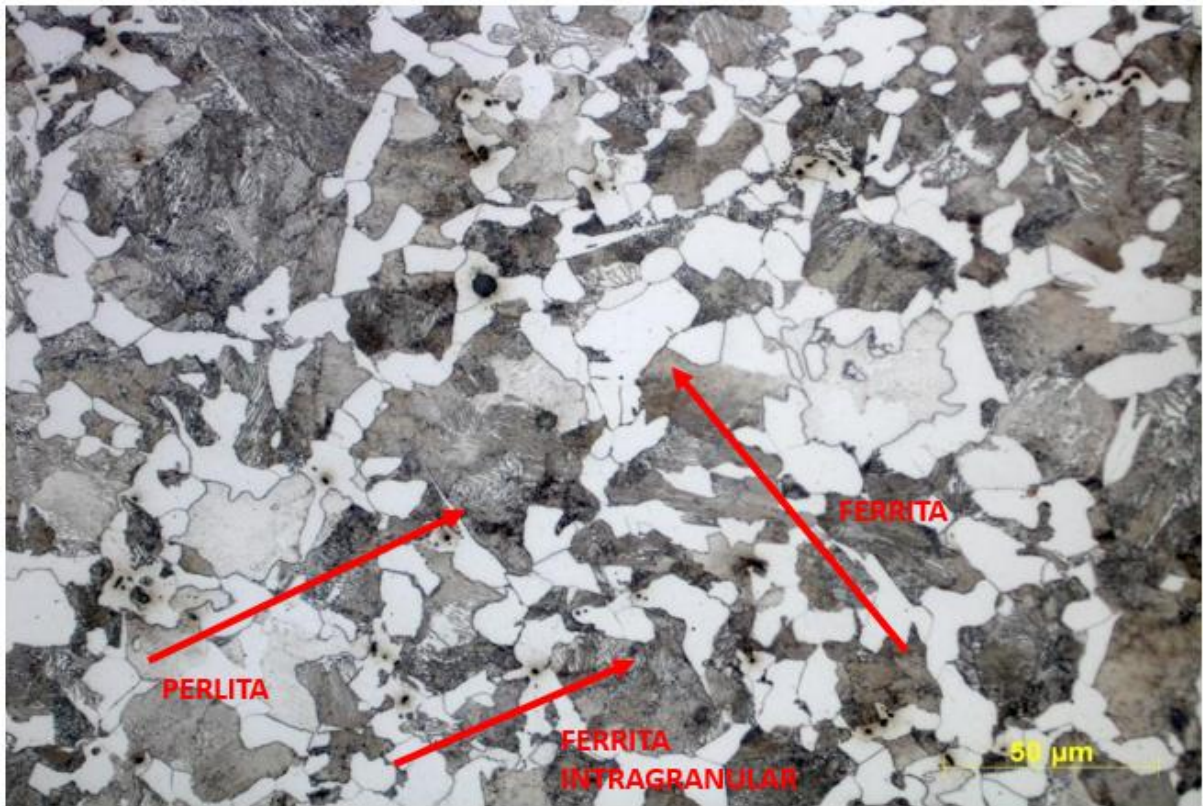


Fonte: Próprio Autor.

1045 CR

A figura 58 mostra a micrografia da amostra 1045 CR. Na imagem observa-se uma microestrutura com matriz ferrítica, regiões de perlita e algumas regiões específicas com ferrita intragranular. (SILVA *et al.*, 2016).

Figura 58. Micrografia da amostra 1045, como recebido e atacado com nital 2%. Aumento de 500x.

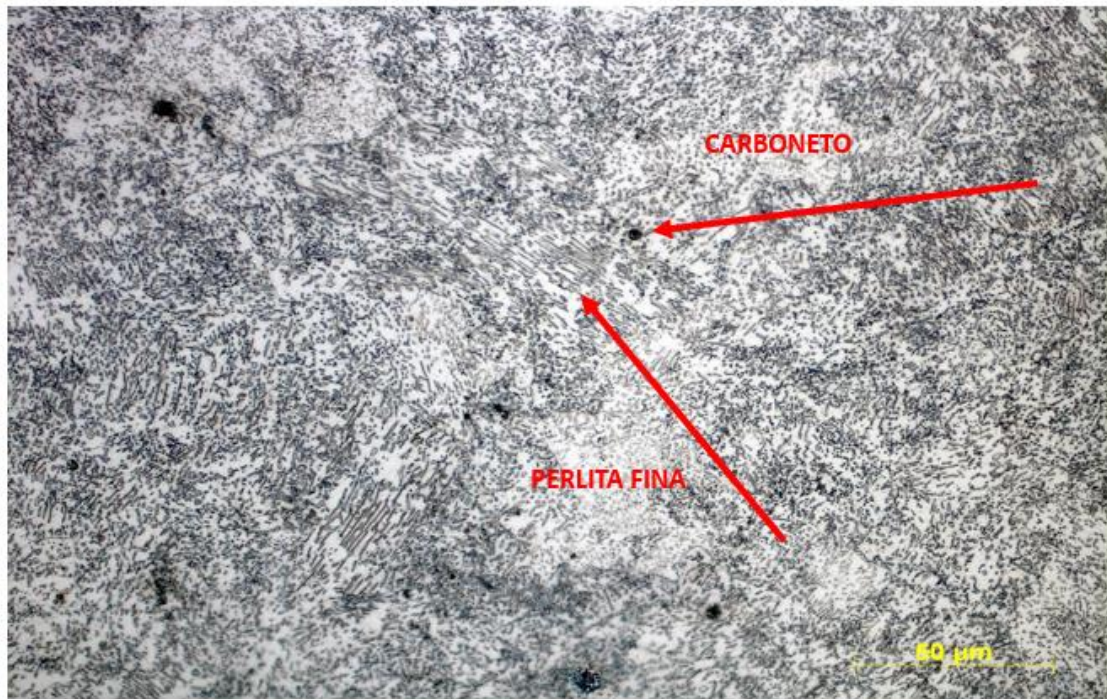


Fonte: Próprio Autor.

5160 CR

A figura 59 mostra a micrografia da amostra 5160 CR. Na imagem observa-se uma matriz predominantemente de perlita fina, devido ao alto teor de carbono e pequenos feixes de carbonetos, que se torna núcleos formador de perlita . (DINIZ, 2005).

Figura 59. Micrografia da amostra 5160, como recebido e atacado com nital 2%. Aumento de 500x

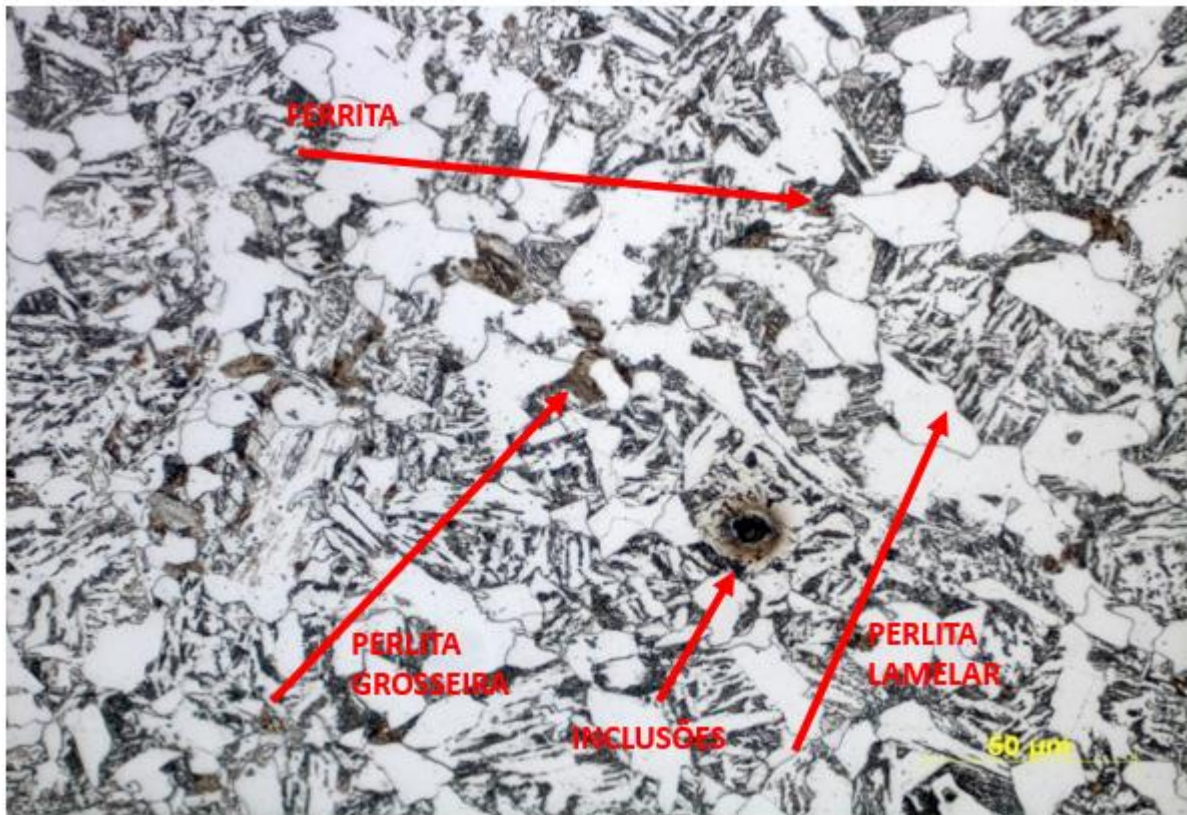


Fonte: Próprio Autor.

8620 CR

Na figura 60 temos a micrografia da amostra 8620 CR. Na imagem observa-se um material constituído por uma matriz de perlita lamelar bem espaçada e algumas regiões de perlita não lamelar (grosseira). E regiões de ferrita bem distribuídas e algumas inclusões em sua região. (MARQUEZI; CECCATTO, 2012).

Figura 60. Micrografia da amostra 8620, como recebido e atacado com nital 2 %. Aumento de 500x.



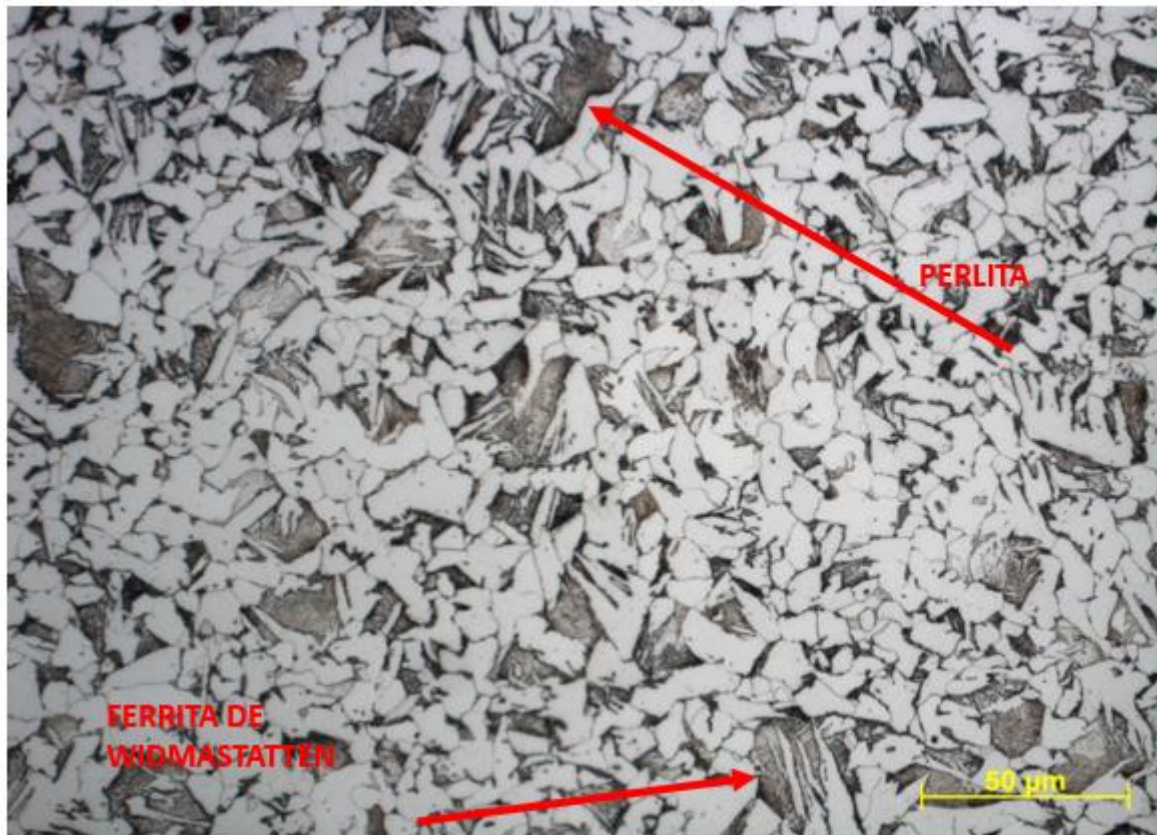
Fonte: Próprio Autor.

5.1.2. Análise micrográfica dos aços temperados dos aços temperados em óleo 1020 T

Comparação da metalográfica da amostra 1020 T (aço 1020 temperado) versus amostra 1020 CR (amostra fornecida).

Na Figura 61 pode-se ver a micrografia da amostra 1020 T e nessa imagem observa-se a presença da ferrita widmastatten localizada nos contornos de grão e algumas regiões de perlita. A presença da ferrita de widmastatten está relacionada com uma cinética de formação diferente dos outros tipos de ferrita. E que, o não aparecimento de martensita nessa condição, está relacionada com a baixa temperabilidade do aço carbono utilizado e pela correlação dele com seu diagrama TTT (LESSA, 2011).

Figura 61. Micrografia da amostra 1020 temperada em óleo e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



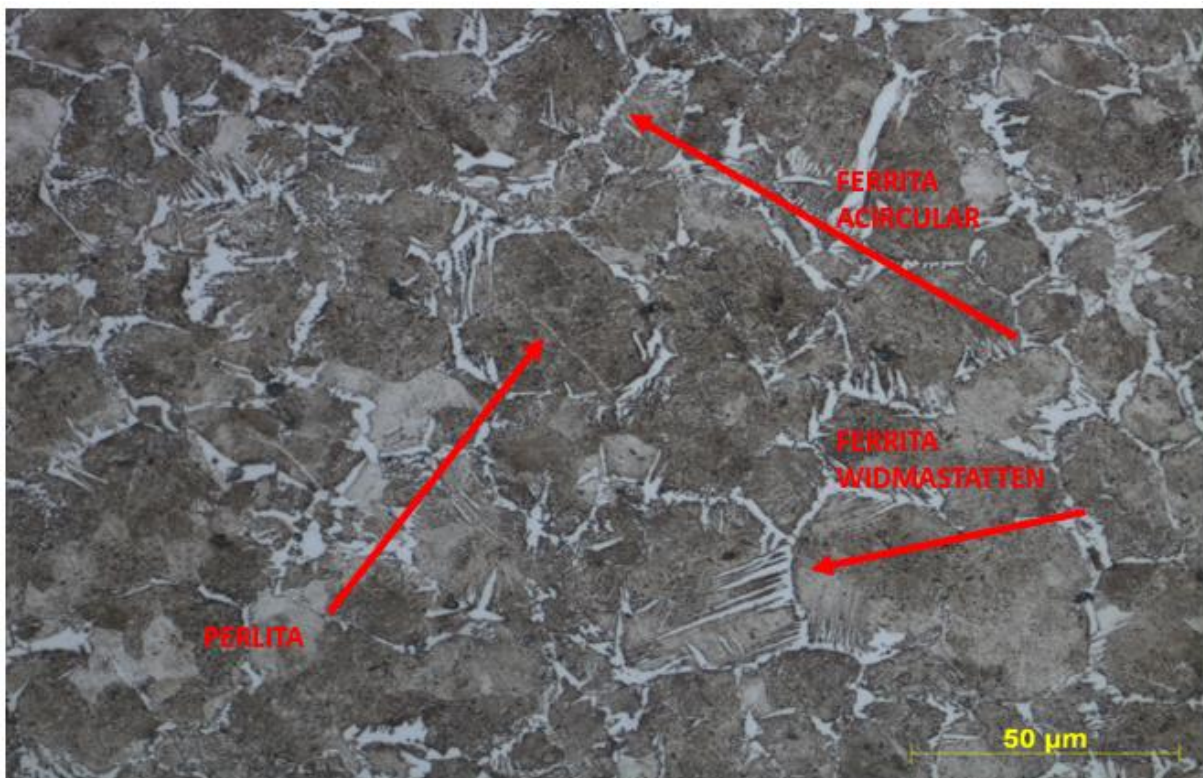
Fonte: Próprio Autor.

1045 T

Comparação da metalográfica da amostra 1045 T (aço 1045 temperado) versus amostra 1045 CR (amostra fornecida).

Na Figura 62 temos a micrografia da amostra 1045 T e nessa imagem observa-se uma matriz perlítica, presença de ferrita acicular nos contornos de grão e com penetração nas colônias de perlita algumas ferrita de widmstätten. Tendo essa característica muito comum, na medida em que aumenta a temperatura de austenitização e a taxa de resfriamento (REBECHI, 2011; NUNURA; SANTOS; SPIM, 2015).

Figura 62. Micrografia da amostra 1045 temperada em óleo e atacada com nital 2 %. Aumento de 500x.



Fonte: Próprio Autor.

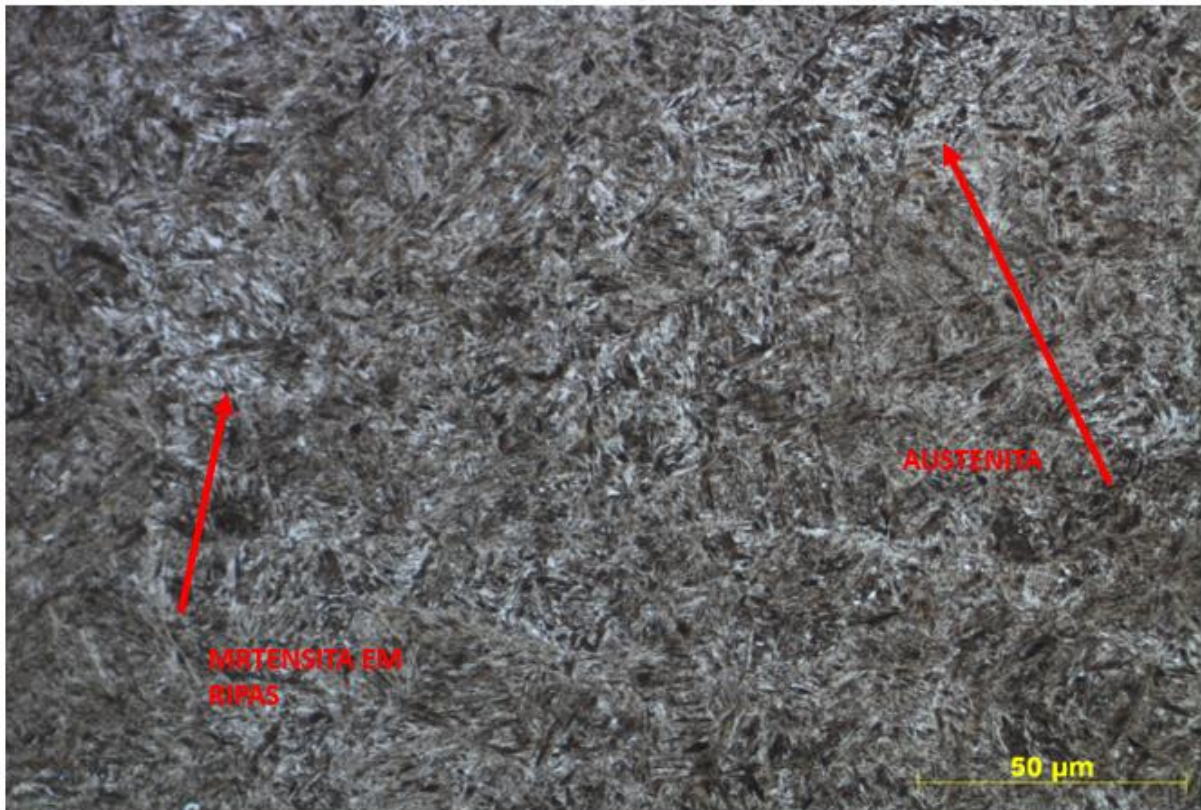
5160 T

Comparação da metalográfica da amostra 5160 T (aço 5160 temperado) versus amostra 5160 CR (amostra fornecida).

Na Figura 63 temos apresentado a micrografia da amostra 5160 T e nessa imagem observa-se a presença de martensita em ripa e algumas regiões de austenita retida (MARCELO *et al.*, 2007; ZEPTER, 2007).

Devido a sua composição química, esse aço tem um elevado teor de carbono, e assim desloca a curva do diagrama TTT para a direita, o que aumenta o campo de formação de martensita e aumenta a preferência e o favorecida pelo tratamento térmico aplicado.

Figura 63. Micrografia da amostra 5160 temperada em óleo e atacada com nital 2 %. Aumento de 500x.



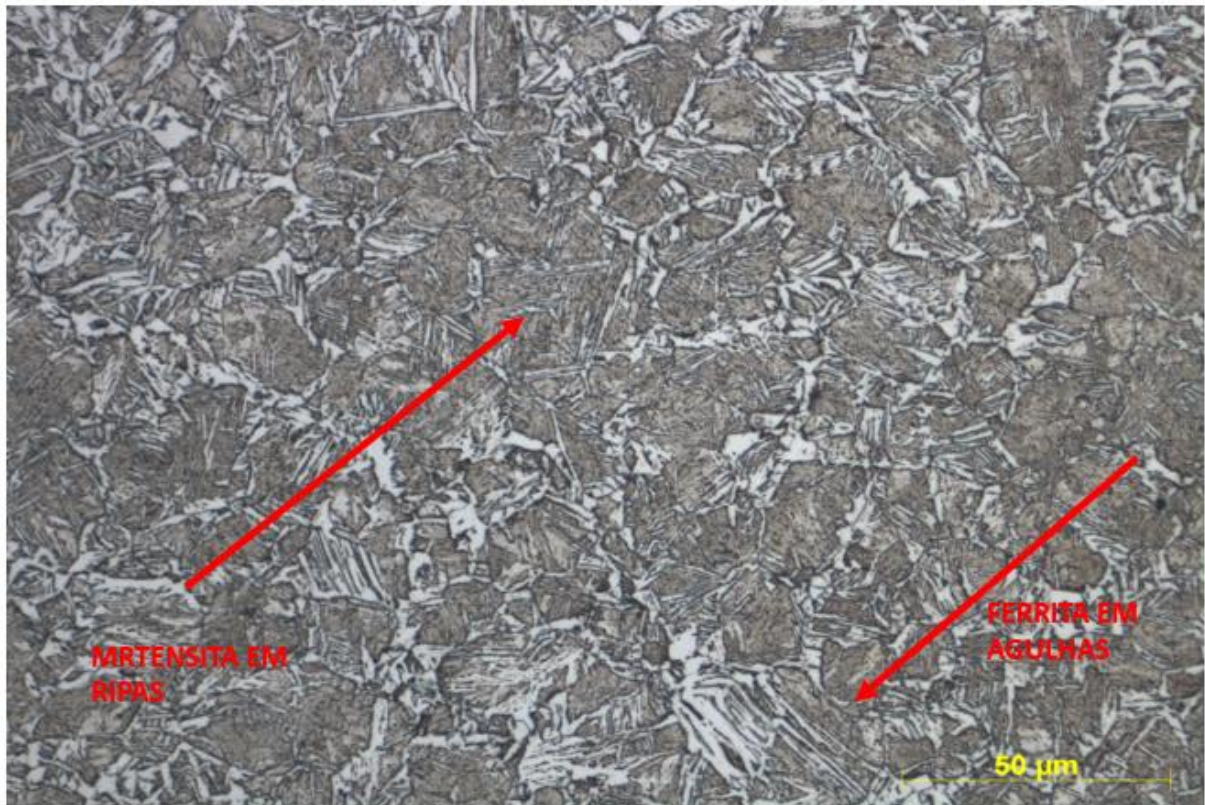
Fonte: Próprio Autor

8620 T

Comparação da metalográfica da amostra 8620 T (aço 8620 temperado) versus amostra 8620 CR (amostra fornecida).

Na Figura 64 temos a micrografia da amostra 8620 T e nessa imagem observa-se a presença de finas ripas de martensita e uma evidente presença de ferrita em forma de agulhas em sua microestrutura. Sendo proposital pela baixa taxa de resfriamento (JUNIOR, 2015).

Figura 64. Micrografia da amostra 8620 temperada em óleo e atacada com nital 2%. Aumento de 500x



Fonte: Próprio Autor.

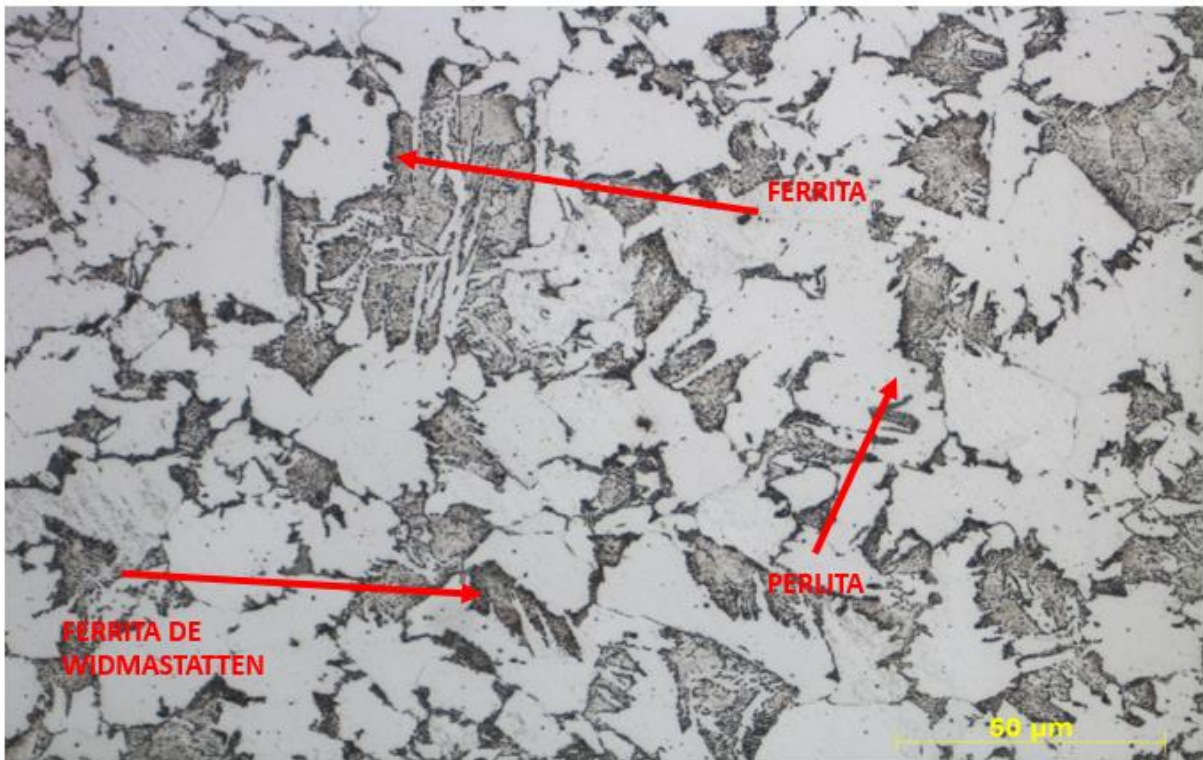
5.1.3. Análise micrográfica dos aços revenidos

1020 RE

Comparação da metalográfica da amostra 1020 RE (aço 1020 revenido) versus amostra 1020 CR (amostra fornecida).

Na Figura 65 temos a micrografia da amostra 1020 RE e nessa imagem observa-se a presença da ferrita de windmastatten, grãos de perlita e ferrita. Sendo possível notar, nenhuma diferença significativa entre a amostra temperada e a mesma como revenida em 600°C. A provável razão é de que devido a microestrutura ser formada basicamente por ferrita e o microconstituente perlita, o aquecimento até 600°C praticamente não afetou a morfologia destes microconstituintes (CRUZ, 2014).

Figura 65. Micrografia da amostra 1020 revenida e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



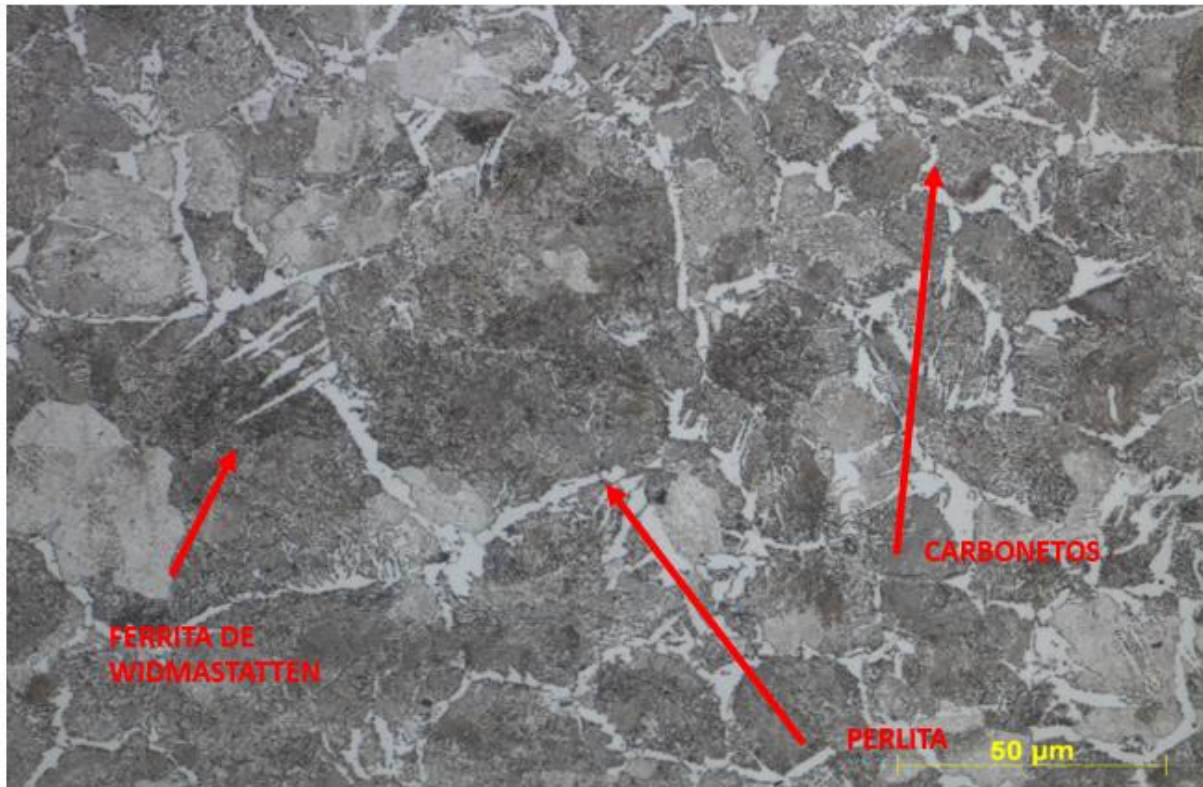
Fonte: Próprio autor

1045 RE

Comparação da metalográfica da amostra 1045 RE (aço 1045 revenido) versus amostra 1045 CR (amostra fornecida).

Na Figura 66 temos apresentado a micrografia da amostra 1045 RE e nesta imagem observa-se a presença de ferrita windmastatten, oriunda do tratamento de têmpera, grãos maiores de perlita em comparação ao 1045 T e há presença de precipitados de carbonetos. O crescimento dos grãos e o aparecimento dos precipitados está relacionado com a faixa de temperatura adotada no tratamento térmico de 600°C. (SILVA *et al.*, 2016)

Figura 66. Micrografia da amostra 1045 revenida e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



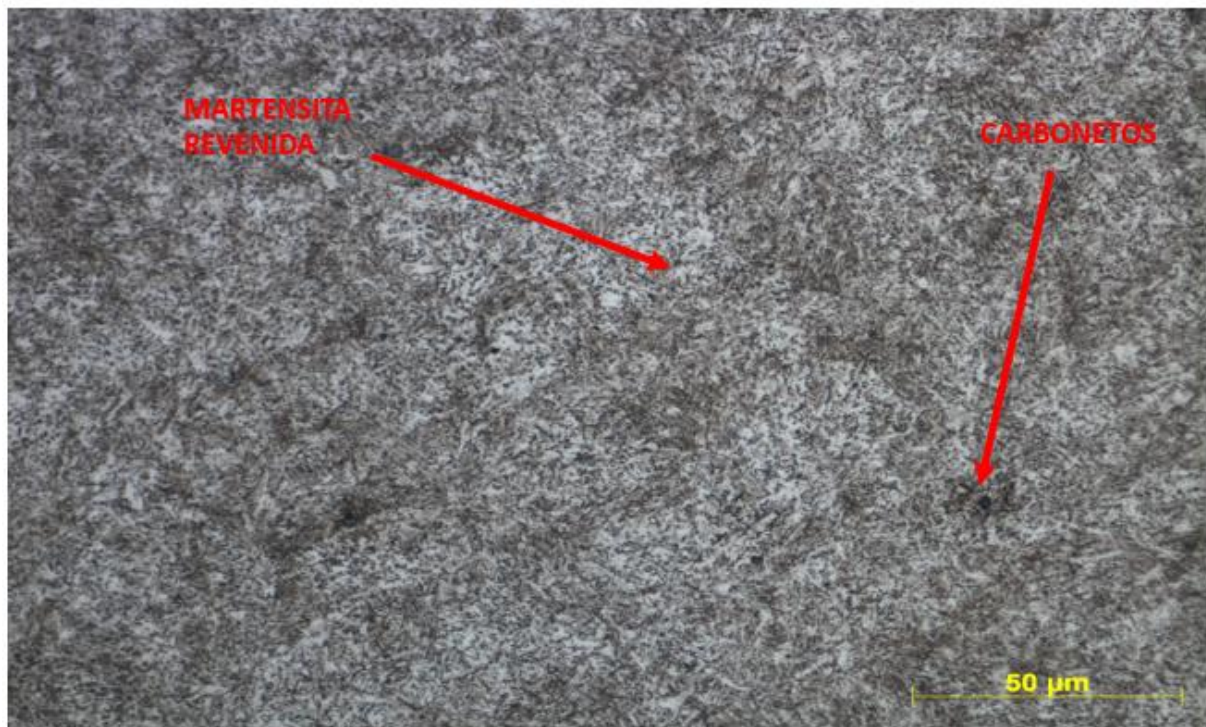
Fonte: Próprio autor.

5160 RE

Comparação da metalográfica da amostra 5160 RE (aço 5160 revenido) versus amostra 5160 CR (amostra fornecida).

Na Figura 67 temos a micrografia da amostra 5160 RE e nesta imagem observa-se a presença de martensita revenida e algumas regiões de carbonetos na matriz ferrítica. (MARCELO *et al.*, 2007; ZEPTER, 2007)

Figura 67. Micrografia da amostra 5160 e atacada com nital 2%. Aumento de 500x



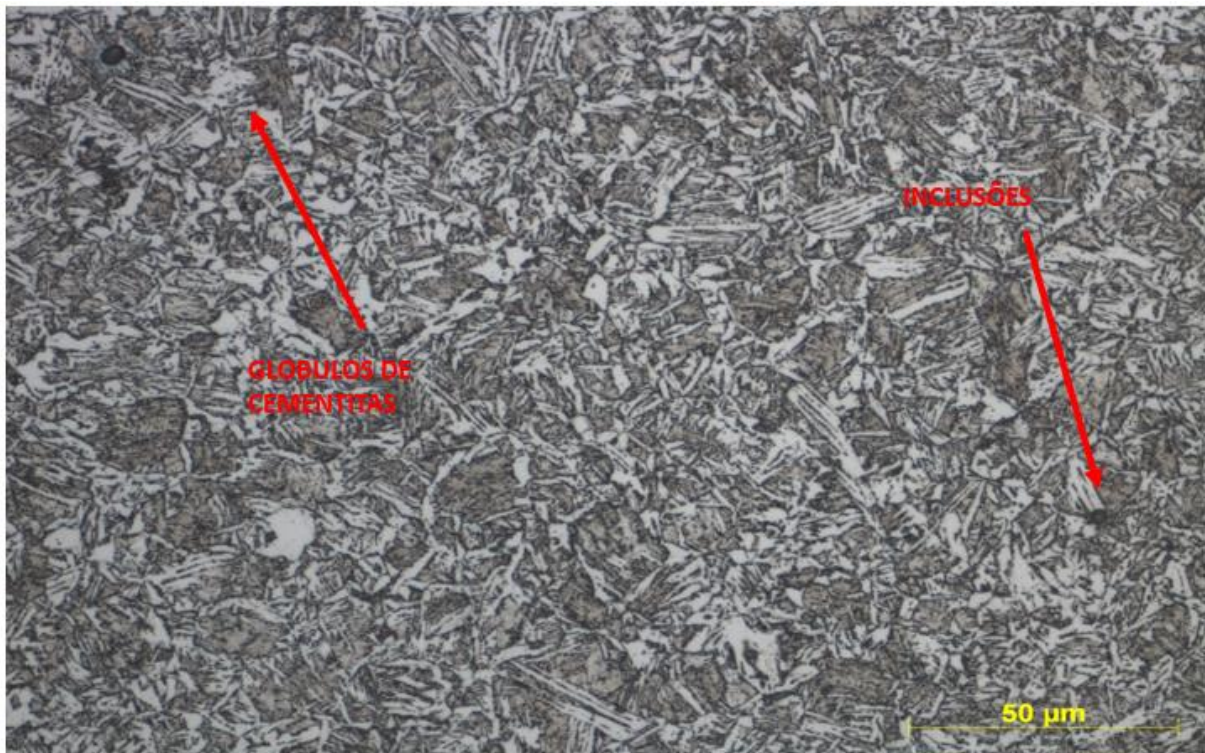
Fonte: Próprio autor

8620 RE

Comparação da metalográfica da amostra 8620 RE (aço 8620 revenido) versus amostra 8620 CR (amostra fornecida).

Na Figura 68 temos a micrografia da amostra 8620 RE e nessa imagem observa-se inclusões e regiões com glóbulos de cementita no interior dos grãos de ferrita. (JUNIOR, 2015)

Figura 68. Micrografia da amostra 8620 revenida e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



Fonte: Próprio autor.

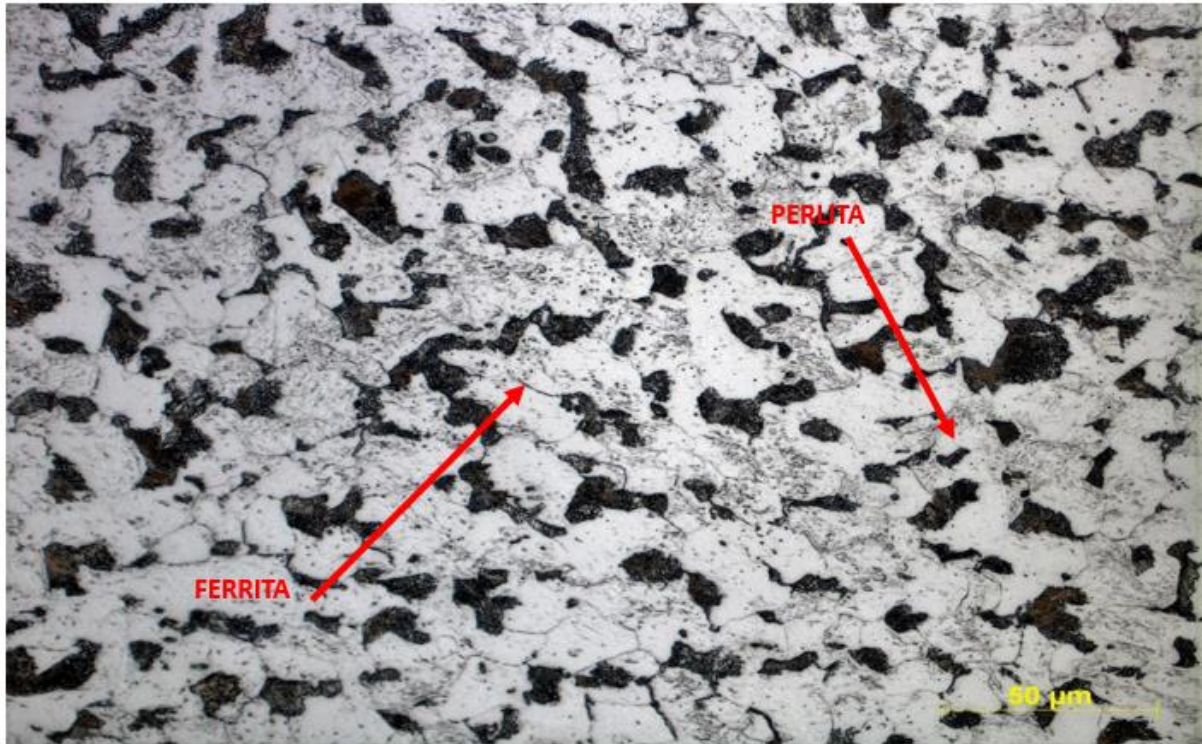
5.1.4 Análise micrográfica dos aços normalizados

1020 N

Comparação da metalográfica da amostra 1020 N (aço 1020 normalizado) versus amostra 1020 CR (amostra fornecida).

Na Figura 69 temos apresentado a micrografia da amostra 1020 N e nessa imagem observa-se a homogeneidade dos grãos de ferrita e um redução nos grãos de perlita. Mas, analisando as modificações com a amostra 1020 CR, temos poucas modificações (CHIAVERINI, 2008).

Figura 69. Micrografia da amostra 1020 normalizada e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



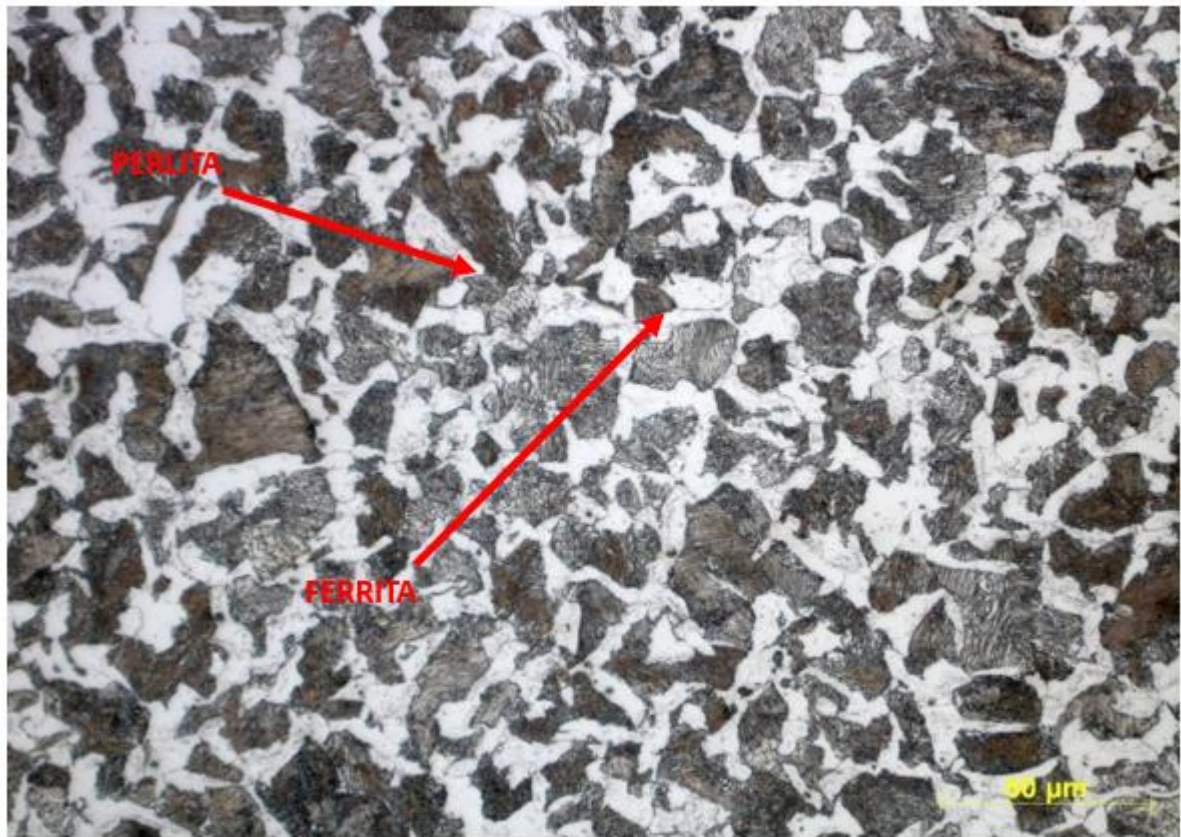
Fonte: Próprio autor.

1045 N

Comparação da metalográfica da amostra 1045 N (aço 1045 normalizado) versus amostra 1045 CR (amostra fornecida).

Na Figura 70 temos a micrografia da amostra 1045 N e nessa imagem observa-se a redução dos grãos de ferrita e algumas perlita. Não havendo grande modificação com a amostra 1045 CR (SILVA, 2016).

Figura 70. Micrografia da amostra 1045 normalizada e atacada com nital 2 %. Aumento de 500x.



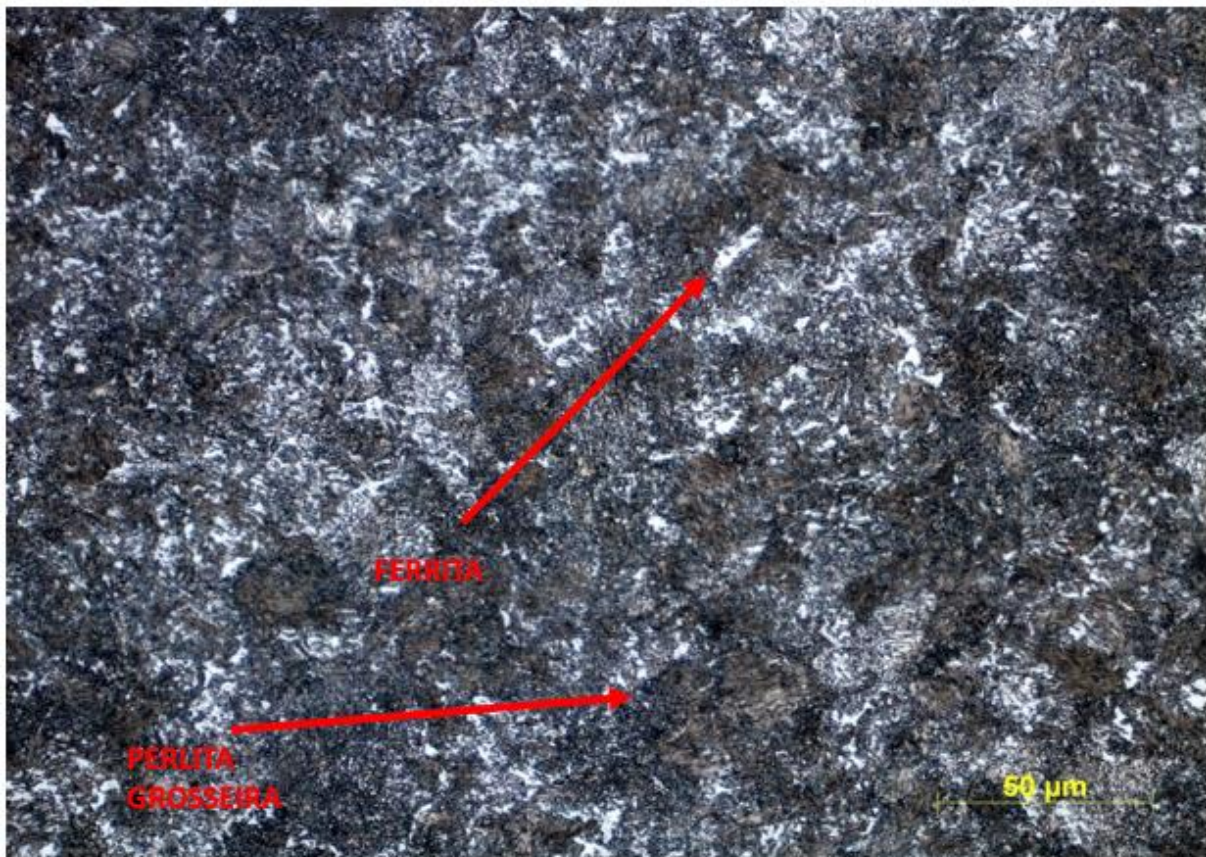
Fonte: Próprio autor.

5160 N

Comparação da metalográfica da amostra 5160 N (aço 5160 normalizado) versus amostra 5160 CR (amostra fornecida).

Na Figura 71 temos a micrografia da amostra 5160 N, temos a predominância de uma microestrutura com perlita grosseira, poucas regiões de ferrita. Tendo essas características microestruturais relacionadas com uma baixa taxa de resfriamento e o alto teor de carbono (ZAKHAROV, 1962).

Figura 71. Micrografia da amostra 5160 normalizada e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



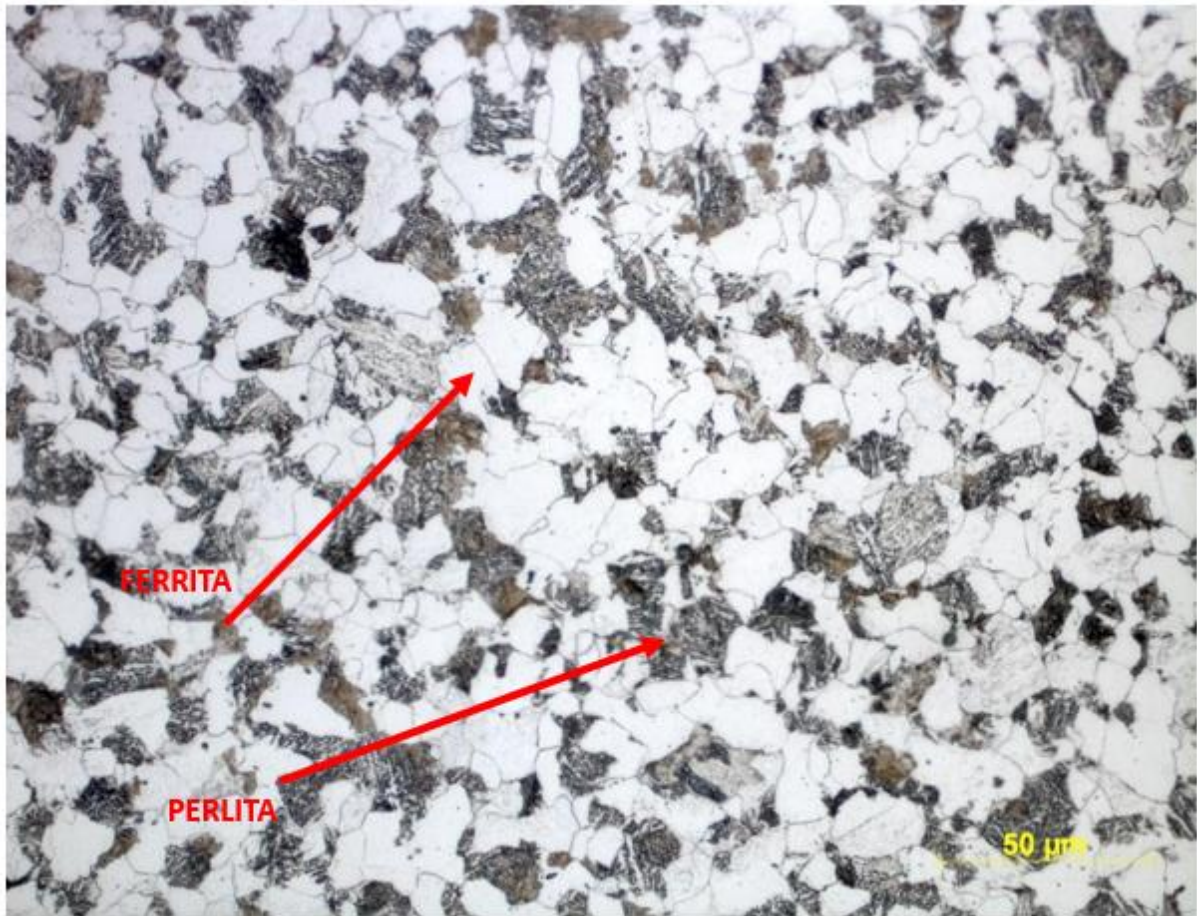
Fonte: Próprio auto

8620 N

Comparação da metalográfica da amostra 8620 N (aço 8620 normalizado) versus amostra 8620 CR (amostra fornecida).

Na Figura 72 temos a micrografia da amostra 8620 N, nessa imagem temos a presença significativa dos grãos de ferrita, uma redução dos microconstituintes da perlita e um menor espaçamento entre as lamelas da perlita, em comparação ao 8620 CR (PERES; SUYAMA; YAMAKAMI, 2006).

Figura 72. Micrografia da amostra 8620 e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



Fonte: Próprio autor.

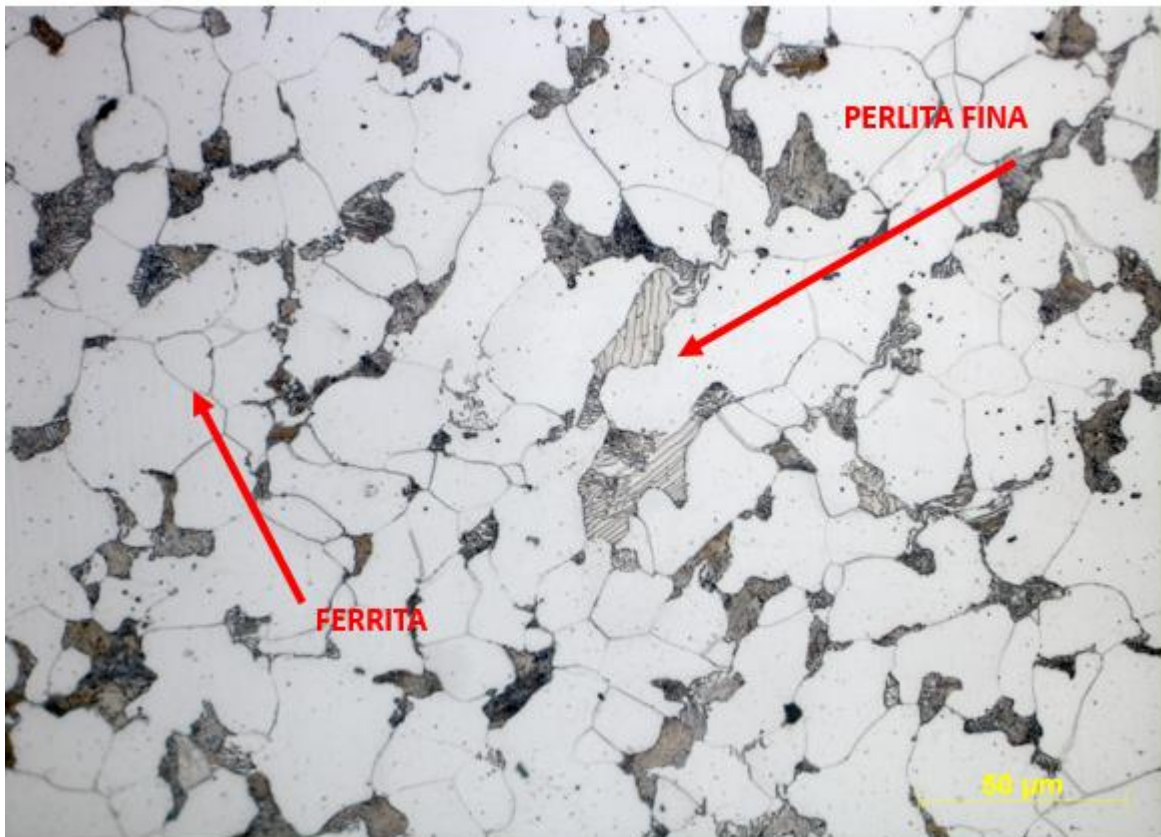
5.1.5 Análise micrográfica dos aços recozidos

1020 R

Comparação da metalografia da amostra 1020 R (aço 1020 recozido) versus amostra 1020 CR (amostra fornecida).

Na Figura 73 temos apresentado a micrografia da amostra 1020 R, nessa imagem observa-se uma estrutura de matriz ferrítica e algumas colônias de perlita fina, devido à baixa temperatura do processo e com localizadas nos contornos de grão, o que não fica evidente em comparação com a microestrutura do 1020 CR (SILVA, 2016).

Figura 73. Micrografia da amostra 1020 recozida plenamente e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



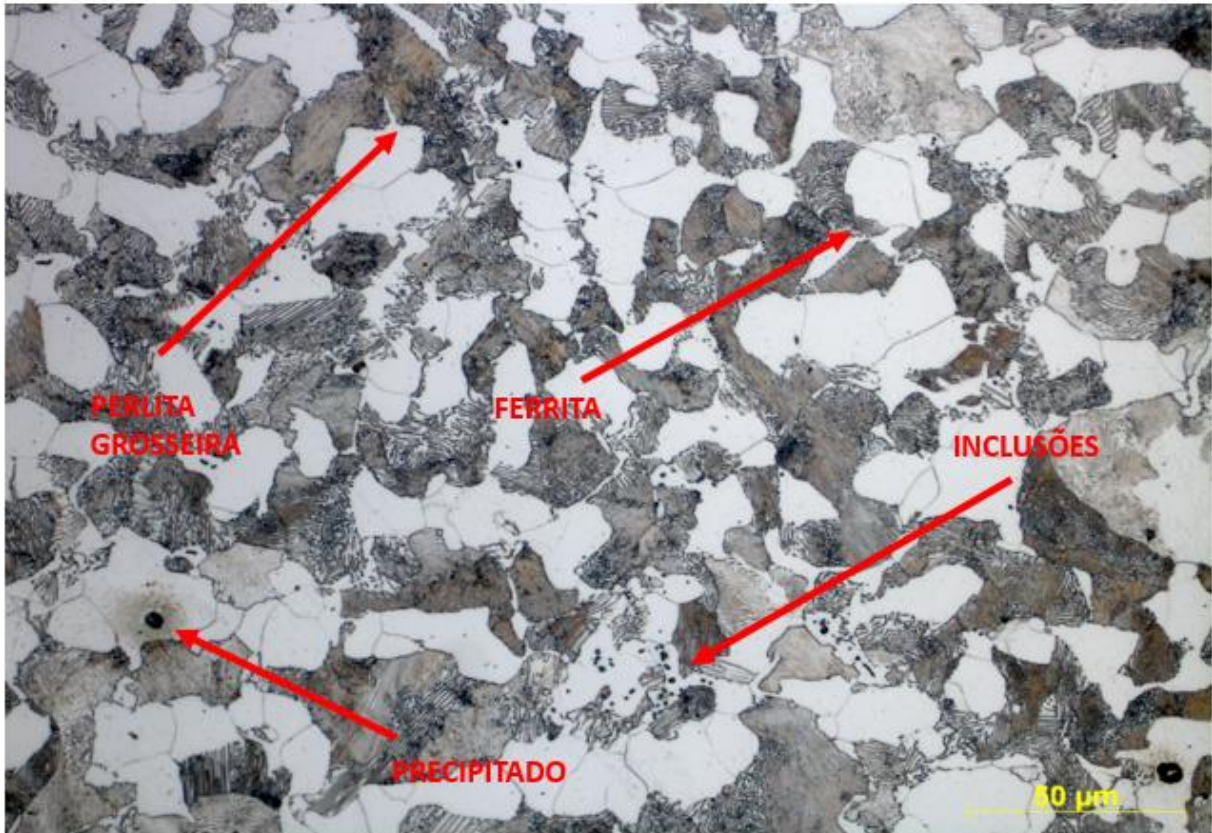
Fonte: Próprio autor.

1045 R

Comparação da metalográfica da amostra 1045 R (aço 1045 recozido) versus amostra 1045 CR (amostra fornecida).

Na Figura 74 temos a micrografia da amostra 1045 R, nessa imagem observa-se uma estrutura ferrita e perlita grosseira. E comparando com o 1045 CR, temos regiões localizadas de inclusões e precipitados (SILVA, 2016; COSTA, 2010).

Figura 74. Micrografia da amostra 1045 recozida plenamente e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



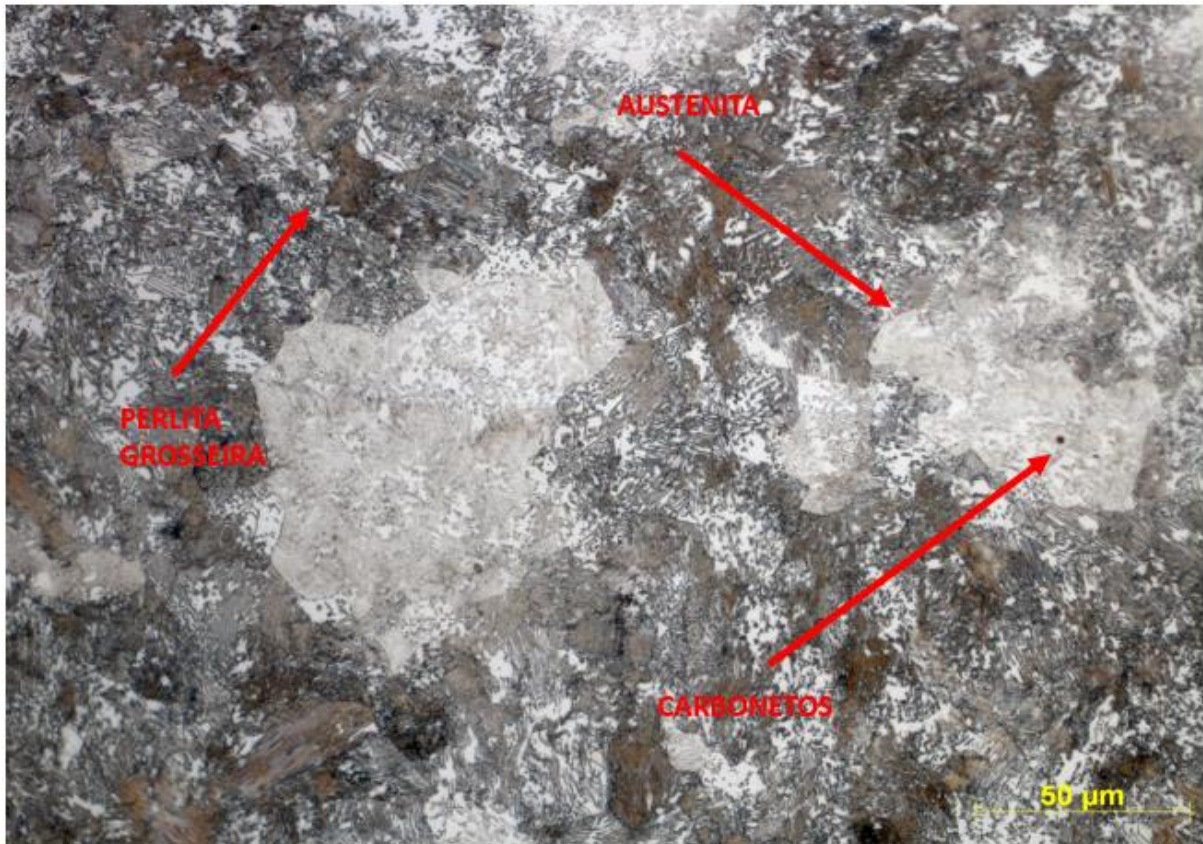
Fonte: Próprio autor.

5160 R

Comparação da metalográfica da amostra 5160 R (aço 5160 recozido) versus amostra 5160 CR (amostra fornecida).

Na Figura 75 temos a micrografia da amostra 5160 R, nessa imagem observa-se grãos grandes deformados de austenita e algumas regiões de perlita grosseira e carbonetos (KRAUSS, 2000).

Figura 75. Micrografia da amostra 5160 recozida plenamente e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



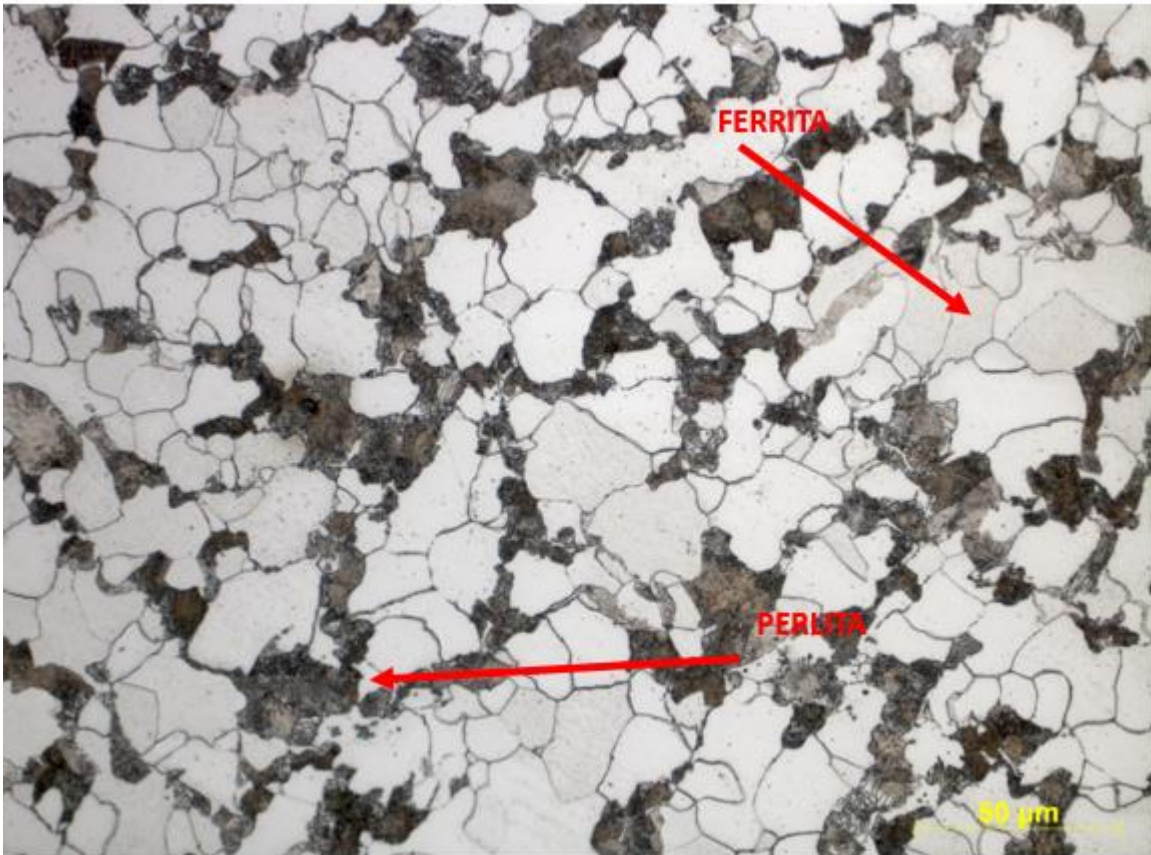
Fonte: Próprio autor.

8620 R

Comparação da metalográfica da amostra 8620 R (aço 8620 recozido) versus amostra 8620 CR (amostra fornecida).

Na Figura 76 temos a micrografia da amostra 8620 R, nessa imagem observa-se claramente uma microestrutura com matriz ferrítica e regiões de microconstituintes de perlita. (PERES; SUYAMA; YAMAKAMI,2006). Aonde a perlita no estado fornecido se encontra no estado lamelar e no estado recozido, portanto temos uma perlita pouco lamelar (HANDBOOK, 2004).

Figura 76. Micrografia da amostra 8620 recozida plenamente e atacada com nital 2%. Aumento de 500x.



Fonte: Próprio autor.

6. CONCLUSÃO

A caracterização microestrutural dos materiais é de fundamental importância para que possamos explicar as suas propriedades e seu comportamento, a partir da análise e observação das fases e constituintes presentes na amostra. Para a obtenção de resultados satisfatórios com relação às análises das micrografias foi necessária uma adequada prática metalográfica de preparação das amostras.

Sendo criada a possibilidade de analisar de acordo com a estrutura obtida, com uma criteriosa análise microestrutural dos resultados das amostras como fornecidas e as apresentadas após os tratamentos térmicos. E, assim, permitindo a possível fundamentação das seguintes conclusões:

- i) O aço SAE 1020 T e 1045 T apresentou uma microestrutura de ferrita de windmastatten, o que está corretamente esperado para esses aços carbonos comum.
- ii) No aço 1045 R, temos uma relação com temperaturas mais altas, o que promove uma menor taxa de nucleação, devido à menor força motriz e assim resultando em maiores grãos de ferrita e perlita mais grosseira.
- iii) No processo de têmpera ao óleo, o meio de resfriamento no aço 5160 T, apresentou ser um meio satisfatório para as seguintes microestruturas esperadas.
- iv) No 5160 RE temos alguns carbonetos, oriundo de alguns elementos de liga característico do próprio material, já que estamos trabalhando com um aço carbono ao cromo. O que pode proporcionar eventuais formações de carbonetos de cromo.
- v) No aço 5160 R, temos uma ocorrência de crescimento exagerado do grão de austenita. Onde o crescimento desordenado do grão de austenita, está relacionado ao processo de austenitização, onde a transformação da ferrita em austenita termina antes que toda a cementita se dissolva na austenita, ficando partículas de cementitas retidas no grão.
- vi) Na amostra 8620 RE, temos algumas inclusões em sua microestrutura, o que pode ter sido oriundo de algum processo de fabricação do material.
- vii) No aço 8620 N, temos a ocorrência de um menor espaçamento entre as lamelas da perlita, em comparação com o 8620 CR. Devido a diminuição da temperatura de transformação.
- viii) No aço 8620 R, temos uma significativa transformação morfológica da perlita lamelar para pouco lamelar. Devendo está relacionado com a baixa taxa de difusão do carbono e a temperatura adotada no processo térmico de recozimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAZAWA, Roberto Masato. **Caracterização Mecânica e Microestrutural de um aço 300M com Microestrutura Multifásica**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

BAIN, Edgar Collins; PAXTON, Harold W. Alloying elements in steel. **1966, 291 P. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, METALS PARK, OHIO**, 1966.

BARREIRO, José Apraiz. **Tratamientos térmicos de los aceros**. Dossat, 1985.

BRAMFITT, Bruce L. Effects of composition, processing, and structure on properties of irons and steels. **Materials Park, OH: ASM International, 1997.**, p. 357-382, 1997.

BRANCO, Felipe Kulig. Influência da microestrutura na anisotropia de chapas metálicas de diferentes aços estruturais. 2007. **Projeto de Iniciação Científica**, 2007.

BURGUER, G.R. et al., L.N2; Udesc/cct. Fac. Tec. Senai Felix Gissard, 2009.

CALLISTER, William D. et al. **Materials Science and Engineering** An Introduction. 8^aed. Wiley, 2013.

CAMPBELL, Flake C. (Ed.). **Elements of metallurgy and engineering alloys**. ASM International, 2008.

CHANDLER, Harry (Ed.). **Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels**. ASM international, 1995.

CHENG, Lin; WAN, X. L.; WU, Kaiming. Three-dimensional morphology of grain boundary Widmanstätten ferrite in a low carbon low alloy steel. **Materials characterization**, v. 61, n. 2, p. 192-197, 2010.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLPAERT, Hubertus et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Blucher, 2008.

COSTA, André Luiz da. et al. **Aços e ligas especiais**. Editora Blucher, 2010.

CRUZ, Murillo Palma Nunes. **Efeito da composição química, da atmosfera cementante e dos ciclos termoquímicos na microestrutura e dureza de aços baixo carbono cementados e temperados** – Florianópolis, SC, 2014.

DINIZ, Eduardo de Oliveira. **Análise da influência do nióbio na microestrutura e propriedades mecânicas da barra chata temperada e revenida para aplicação em feixes de mola**. Dissertação (mestrado em engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

FERGUSON H., Heat treatment of ferrous powder metallurgy parts, in Powder Metal Technologies and Applications, **ASM International**, Metals Park, OH, 1998.

GUY, Albert G. **Elements of Physical Metallurgy**, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1959.

HANDBOOK, A. S. M.. **Metallography and Microstructures**, Vol 9.ASM international, 2004.

HUDOK, D. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. **Metals handbook**, v. 1, p. 200-211, 1990.

JUNIOR, Dirceu da Silva et al. Comparação microestrutural de dois aços para utilização em moldes de fabricação de compósitos, p. 2865-2871. In: **15º Enemet [ABM WEEK 2015]**, Rio de Janeiro, 2015.

KRAUSS, George. **Steels: heat treatment and processing principles**. 6. ed. Ohio: ASM International, 2000.

KRISHNA, P. Vamsi et al. Effect of austempering and martempering on the properties of AISI 52100 Steel. **International Scholarly Research Notices**, 2013.

LESSA, Cleber Rodrigo de Lima. **Soldagem FHPP: Processo e Metalurgia nas Transformações das Fases de Um Aço C-Mn**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MARCELO, André Luiz et al. Fragilização da martensita revenida em parafusos: análise de dois casos, **anais do 8º Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica**, 23 a 25 de outubro de 2007.

MARQUEZI, Sérgio Luís; CECCATTO, Sandro Luiz. A usinabilidade nos aços para cementação SAE 8620 e DIN 20MNCr5. **Unoesc & Ciência - ACET**, [S.l.], v.3, n.1, p. 91-108, jun. 2012.

NORMALIZAÇÃO, Comissão de. **GUIA DE NORMALIZAÇÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS DA**. 2013. Universidade Federal do Ceará, 2013.

NOVIKOV, Ivan Ivanovich. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Ed. UFRJ, 1994.

NUNURA, Cesar RN; SANTOS, Carlos A. dos.; SPIM, Jaime A. Numerical–Experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test. **Materials & Design**, v. 76, p. 230-243, 2015.

PERES, Guilherme Wolf; SUYAMA, Daniel Iwao; YAMAKAMI, Wyser José. Análise da dureza superficial de um aço forjado a quente sob diferentes condições de resfriamento. In: **XVIII Congresso de Iniciação Científica da UNESP**, 2006, Bauru. XVIII CIC/UNESP, 2006.

PIRES, Raphael Rezende. **Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito**. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.

REED-HILL, Robert E.; Physical Metallurgy Principles. Boston, Mass, 3^a ed, 1994.

REED-HILL, Robert E.; ABBASCHIAN, Reza. **Physical metallurgy principles**. New York: Van Nostrand, 1991.

REBECHI, João Guilherme. Correlações numéricas entre taxas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140. 2011.

SANTOS, Rezende Gomes dos. Transformações de fases em materiais metálicos. **Campinas SP Editora Unicamp**, p. 17, 2006.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, Amanda Cristina Medeiros da. Tratamento térmico de têmpera no aço SAE 1040 em diferentes meios de resfriamento. **Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal Fluminense**, 2016.

SILVA, Cleiton C. et al. Evaluation of AISI 4140 steel repair without post-weld heat treatment. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 18, n. 3, p. 324-331, 2009.

SMITH, William Fortune. Structure and properties of engineering alloys. **McGraw-Hill Book Co.**, xiv+ 512, 23 x 16 cm, illustrated(16. 95), 1993.

SPURAND, G.; STÖFERLE, T. Handbuch der Fertigungstechnik. **Bd**, v. 4, n. 1, p. 60-134, 1997.

STEIN, Cristiano Ramos et al. Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE1045. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 58, p. 51-56, 2005.

TARIN, Pascual; PEREZ, Javier. **Low-alloy steels: Their properties and how to obtain them**. ASM International SteCal 3.0.3, 2004.

THEWLIS, G. Classification and quantification of microstructures in steels. **Materials Science and technology**, v. 20, n. 2, p. 143-160, 2004.

TOMITA, Yoshiyuki; OKABAYASHI, Kunio. Heat treatment for improvement in lower temperature mechanical properties of 0.40 pct C-Cr-Mo ultrahigh strength steel. **Metallurgical Transactions A**, v. 14, n. 11, p. 2387-2393, 1983.

TOTTEN, George E. (Ed.). **Steel Heat Treatment Handbook-2** Volume Set. CRC press, 2007.

TSCHIPTSCHIN, André P.; OLIVEIRA, Sandro D.; PINEDO, Carlos E. Simultaneous plasma nitriding and ageing treatments of precipitation hardenable plastic mould steel. **Materials & design**, v. 28, n. 5, p. 1714-1718, 2007.

UNTERWEISER, Paul M.; BOYER, Howard E.; KUBBS, James J. (Ed.). **Heat treater's guide: standard practices and procedures for steel**. Asm International, 1982.

VLACK, Lawrence H. Van. Princípios de ciência e tecnologia dos materiais. **Editora Campus, 4th ed., Rio de Janeiro-RJ**, 1984.

ZAKHAROV, B. **Heat-treatment of metals**. Tradução de N. Ivlev. 1 ed. Moscow Peace Publishers. 311 p, 1962.

ZEPTER, Paulo Gilberto. **Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas do aço ABNT 5160 em condições de carregamento monotônico e cíclico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.