



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

GEORGE HENRIQUE DINI

**Estudo de diferentes ciclos de tratamento térmico de esferoidização para
aços da família AISI 51XX.**

Guaratinguetá
2017

GEORGE HENRIQUE DINI

**Estudo de diferentes ciclos de tratamento térmico de esferoidização
para aços da família AISI 51XX.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Jorge Abdalla
Co-orientador: Dr. Rafael Mota Siqueira

Guaratinguetá
2017

D58
5e

Dini, George Henrique

Estudo de diferentes ciclos de tratamento térmico de esferoidização para aços da família AISI 51XX / George Henrique Dini – Guaratinguetá, 2017.

83 f : il.

Bibliografia: f. 79 - 83

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Jorge Abdalla

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Mota Siqueira

1. Aço - Tratamento térmico. 2. Aço de alta resistência. 3. Usinagem.

I. Título

CDU 669.14 (043)

GEORGE HENRIQUE DINI

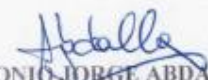
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

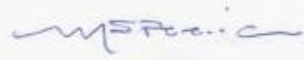
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANTONIO JORGE ABDALLA
Orientador - UNESP/FEG


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
UNESP/FEG


Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO
FATEA/Lorena

DADOS CURRICULARES

GEORGE HENRIQUE DINI

NASCIMENTO 21.07.1990 – SÃO PAULO / SP

FILIAÇÃO George Hamilton Dini
Paula Cristina Scafoglio Dini

2008/2013 Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da
Universidade Estadual Paulista.

2014/2017 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica nível de Mestrado.
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade
Estadual Paulista.

*A toda a minha família,
Em especial aos meus pais George Hamilton Dini e Paula Cristina Scafoglio Dini
e aos meus irmãos Guilherme Henrique Dini e Pedro Gabriel Dini pelo apoio e
incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Ogun, pela força e por guiar o meu caminho nos momentos mais difíceis. Agradeço pela minha vida, minha proteção, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Antonio Jorge Abdalla*, que me incentivou ao longo desta dissertação. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado não existiria;

aos meus avós *Romulo Paulo Scafoglio, Irene Tofani Scafoglio, Teresa Dini e Alfredo Dini Neto*, pelo amor e suporte;

à minha noiva *Carolina Melo Ferreira* pelo apoio incondicional, me dando suporte emocional independente das dificuldades encontradas e por estar sempre ao meu lado;

à Gerdau S.A., pela oportunidade de emprego e por todo o aprendizado que pude obter até agora;

a todos os meus amigos que pude conhecer e que moraram comigo ao longo destes anos; à República Papagatas, uma “grande família”;

aos meus amigos *Gabriel Canteiro de Farias e Gabriel Rosa*, pelo apoio e pela amizade.

”A força de vontade deve ser mais forte
do que a habilidade.”

Muhammad Ali

RESUMO

Este trabalho se propõe a estudar ciclos de tratamentos térmicos capazes de produzir, com eficiência e redução de custo, estruturas esferoidizadas em aços especiais. Os ciclos de tratamento térmico de esferoidização foram aplicados em aços da família AISI 51XX, com diferentes teores de carbono. Após a preparação das amostras foram aplicados ciclos de tratamentos térmicos alterando-se o tempo e a temperatura de permanência em forno, de forma a obter estruturas esferoidizadas como forma de reduzir a dureza e resistência do aço para facilitar a trabalhabilidade, principalmente a usinagem deste aço. Para avaliar as propriedades mecânicas foram realizados testes de dureza e tração. A microestrutura foi estudada a partir de amostras preparadas metalograficamente e analisadas por microscopia óptica. O novo ciclo proposto apresentou propriedades mecânicas compatíveis com as esperadas no processo de esferoidização, neste estudo, um único ciclo pode ser aplicado em três diferentes tipos de aços AISI 5115, 5140 e 5160. É esperado que, através deste processo, se consiga uma estrutura esferoidizada adequada, com o menor custo de produção associado. O novo tratamento proposto mostrou-se adequado para os três tipos de aço estudados, porém, para o aço 5160, o grau de esferoidização encontra-se no limite aceitável para este aço (60%). Além do grau de esferoidização não ocorreram desvios consideráveis, dessa forma, com o ciclo proposto sendo validado, pode-se ganhar em média 3 dias de produção a mais por mês.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento Térmico; Aços 51XX; Esferoidização; Caracterização Microestrutural; Usinagem; Redução de Custo.

ABSTRACT

This work proposes to study cycles of thermal treatments capable of efficiently producing and reducing cost, spheroidal structures in special steels. The spheroidization heat treatment cycles were applied to AISI 51XX Steels, with different carbon contents. After the preparation of the samples, cycles of thermal treatments were applied, altering the time and temperature of the furnace, in order to obtain spheroidal structures as a way to reduce the hardness and strength of the steel to facilitate the workability, mainly the machining of this steel. In order to evaluate the mechanical properties, hardness and tensile tests were performed. The microstructure was studied from samples prepared metallographically and analyzed by optical microscopy. The proposed new cycle presented mechanical properties compatible with those expected in the spheroidization process, in this study, a single cycle can be applied to three different types of AISI 5115, 5140 and 5160 steel. It hopes, through this process, that an adequate spheroidal structure will be achieved, with the lowest associated production cost. The new treatment proved to be adequate for the three types of steel studied, but for 5160 steel, the degree of spheroidization is within the limit acceptable for this steel (60%). In addition to the degree of spheroidization, there were no significant deviations, so with the proposed cycle being validated, an average of 3 more production days per month can be gained.

KEYWORDS: Heat treatment; Steel 51XX; Spheroidization; Microstructural Characterization; Machining; Cost Reduction.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	AÇO E SIDERURGIA	17
2.1.1	Classificações de usinas siderúrgicas.....	18
2.1.2	Processo siderúrgico.....	19
2.1.3	Aços especiais.....	20
2.1.3.1	Aços Especiais Longos	21
2.1.3.2	Aços para Construção Mecânica	21
2.1.3.3	Aços de Alta-Liga	21
2.2	FAMÍLIAS DE AÇOS – CLASSIFICAÇÃO SAE e AISI	22
2.2.1	Família 51XX.....	23
2.2.1.1	AISI 5115 – DIN 16MnCr5	23
2.2.1.2	AISI 5140 – DIN41Cr4.....	24
2.2.1.3	AISI 5160	24
2.3	CURVAS TTT e RC.....	25
2.4	TRATAMENTO TÉRMICO	29
2.4.1	Tratamento térmico de recozimento	29
2.4.1.1	Recristalização durante o recozimento.....	30
2.4.2	Esferoidização.....	31
2.4.2.1	Recozimento de esferoidização.....	32
2.4.2.2	Ciclos térmicos de esferoidização	34
2.4.2.3	Etapas de esferoidização da cementita da perlita	35
2.4.2.4	Mecanismos do fenômeno de esferoidização.....	37
2.4.2.5	Efeito de alguns elementos de liga na esferoidização	38
2.4.2.6	Influência do ciclo de recozimento	38
2.4.2.7	Influência da composição química.....	40
2.5	EFEITOS DA ESFEROIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS.....	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1	MATERIAIS.....	43
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43

3.3	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	44
3.4	LAMINAÇÃO	44
3.5	TRATAMENTOS TÉRMICOS	46
3.5.1	Curvas CCT para aços da família 51XX.....	47
3.5.2	Ciclo de tratamento térmico do Aço 5115.....	47
3.5.3	Ciclo de tratamento térmico do Aço 5140.....	49
3.5.4	Ciclo de tratamento térmico do Aço 5160.....	50
3.6	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	52
3.6.1	Ensaio mecânico	52
3.6.1.1	Ensaio de dureza	52
3.6.1.2	Ensaio de Tração	52
3.7	PREPARAÇÃO METALOGRAFICA.....	53
3.7.1	Determinação da microestrutura de partida.....	53
3.7.2	Determinação do Grau de Esferoidização	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	MICROGRAFIAS DOS AÇOS 5115, 5140 E 5160, CONFORME RECEBIDOS, TRATADOS TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO NOVO CICLO PROPOSTO	55
4.1.1	Micrografias do aço 5115.....	55
4.1.1.1	Micrografia do aço 5115 – como recebido	55
4.1.1.2	Micrografia do aço 5115 – tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO1	56
4.1.1.3	Micrografia do aço 5115 – tratado termicamente no novo ciclo proposto, ESFERO2.....	57
4.1.2	Micrografias do aço 5140.....	58
4.1.2.1	Micrografia do aço 5140 – como recebido	58
4.1.2.2	Micrografia do aço 5140 – no ciclo padrão, ESFERO2.....	59
4.1.3	Micrografias do aço 5160.....	60
4.1.3.1	Micrografia do aço 5160 – como recebido	60
4.1.3.2	Micrografia do aço 5160 – tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO3.....	61
4.1.3.3	Micrografia do aço 5160 – tratado termicamente no novo ciclo proposto, ESFERO2.....	62
4.2	ENSAIO DE DUREZA (HB).....	63
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO	65

4.3.1 – Comparação entre os gráficos de tração para os aços 5115, 5140 e 5160.	65
4.3.2 - Resistência Mecânica (MPa)	68
4.3.3 – Estricção	69
4.3.4 – Alongamento	71
4.4.4 – Limite de escoamento	73
4.5 – GRAU DE ESFEROIDIZAÇÃO	74
5 – CONCLUSÕES	77

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA ILUSTRATIVO DA OPERAÇÃO DE UM ALTO-FORNO.....	19
FIGURA 2: FLUXO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO EM UMA USINA SIDERÚRGICA.....	20
FIGURA 3: ENGRENAGEM PRODUZIDA COM AÇO 5115.	24
FIGURA 4: SEMI-EIXO - PRODUTO FABRICADO UTILIZANDO O AÇO 5140.....	24
FIGURA 5: MOLAS PARA AUTOMÓVEIS PRODUZIDOS COM O AÇO AISI 5160.....	25
FIGURA 6: DIAGRAMA TTT DO AÇO 1080.	26
FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA TRANSFORMAÇÃO TÉRMICA EM UMA CURVA TTT.....	27
FIGURA 8: DIFERENTES CURVAS DE RESFRIAMENTO CONTROLADO.	28
FIGURA 9: MICROESTRUTURAS FORMADAS EM CONSEQÜÊNCIA DAS SEIS VELOCIDADES DE RESFRIAMENTO INDICADAS NA FIGURA 8. OS NÚMEROS DPH SÃO AS DUREZAS VICKERS DE CADA ESTRUTURA.	28
FIGURA 10: DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO O TRATAMENTO TÉRMICO DE ESFEROIDIZAÇÃO E A ESTRUTURA DE ESFEROIDITA FORMADA APÓS O TRATAMENTO.	31
FIGURA 11: DIAGRAMA DE FASES FERRO-CARBONO EVIDENCIANDO A FAIXA DE TEMPERATURA UTILIZADA PARA O RECOZIMENTO DE ESFEROIDIZAÇÃO.(A1 – TEMPERATURA EUTETÓIDE, A3 E ACM TEMPERATURAS CRÍTICAS PARA OS AÇOS HIPO E HIPEREUTETÓIDES).	33
FIGURA 12: CICLOS TÉRMICOS UTILIZADOS PARA O PROCESSO DE RECOZIMENTO DE ESFEROIDIZAÇÃO.	34
FIGURA 13: EFEITO DO RAIO DE CURVATURA DE UMA PARTÍCULA SOBRE A ESFEROIDIZAÇÃO.....	38
FIGURA 14: INFLUÊNCIA DO CROMO NA ESFEROIDIZAÇÃO DO AÇO CARBONO.....	41
FIGURA 15: LAYOUT DO LAMINADOR DE FIO-MÁQUINA. (GEORGE, NÃO DÁ PARA MELHORAR UM POUCO ESTA IMAGEM? FICA UM POUCO DIFÍCIL DE LER ALGUMAS INDICAÇÕES NA FIGURA)	45
FIGURA 16: FORMAÇÃO DE ESPIRAS NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO, (A)FORMAÇÃO DE ESPIRAS; (B)DISPOSIÇÃO DAS ESPIRAS NA ESTEIRA.	46
FIGURA 17: ESQUEMA MOSTRANDO AS ZONAS DE CONTROLE AO LONGO DO TRAJETO DENTRO DO FORNO.	47
FIGURA 18: DIAGRAMA CCT PARA O AÇO 5115.	48
FIGURA 19: CICLO PADRÃO (ESFERO1) UTILIZADO PARA ESFEROIDIZAÇÃO DO AÇO 5115.	49
FIGURA 20: CURVA CCT PARA O AÇO 5140.....	49
FIGURA 21: CICLO PADRÃO (ESFERO 2) UTILIZADO PARA ESFEROIDIZAÇÃO DO AÇO 5140.	50
FIGURA 22: CURVA CCT PARA O AÇO 5160.	51
FIGURA 23: CICLO PADRÃO (ESFERO 3) UTILIZADO PARA ESFEROIDIZAÇÃO O AÇO 5160. 51	
FIGURA 24: CORPO DE PROVA PADRÃO ASTM PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	53
FIGURA 25: MICROGRAFIA DO AÇO 5115 COMO RECEBIDO COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.....	56

FIGURA 26: MICROGRAFIA DO AÇO 5115 TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO, ESFERO1, COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.....	57
FIGURA 27: MICROGRAFIA DO AÇO 5115 TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PROPOSTO, ESFERO2, COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.....	58
FIGURA 28: MICROGRAFIA DO AÇO 5140 BRUTO COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.	59
FIGURA 29: MICROGRAFIA DO AÇO 5140 TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO, ESFERO2, QUE COINCIDE COM O NOVO CICLO PROPOSTO, COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.	60
FIGURA 30: MICROGRAFIA DO AÇO 5160 COMO RECEBIDO, COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.	61
FIGURA 31: MICROGRAFIA DO AÇO 5160 TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO, ESFERO3, COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.....	62
FIGURA 32: MICROGRAFIA DO AÇO 5160 TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PROPOSTO, ESFERO2, COM AUMENTO DE 500X. ATAQUE NITAL.....	63
FIGURA 33: REPRESENTAÇÃO DOS INTERVALOS DE DUREZA (HB) PARA OS AÇOS AISI 5115, 5140 E 5160 NAS CONDIÇÕES: COMO RECEBIDO, TRATADOS TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E TRATADOS TERMICAMENTE NO NOVO CICLO PROPOSTO – ESFERO2.	65
FIGURA 34: APRESENTA AS CURVAS DE TRAÇÃO DO AÇO 5115 PARA AS CONDIÇÕES: COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO CICLO PROPOSTO.	66
FIGURA 35: APRESENTA AS CURVAS DE TRAÇÃO DO AÇO 5140, PARA AS CONDIÇÕES: COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO, QUE É O MESMO CICLO DO PROPOSTO.	67
FIGURA 36: APRESENTA AS CURVAS DE TRAÇÃO DO AÇO 5160 PARA AS CONDIÇÕES: COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO CICLO PROPOSTO.	68
FIGURA 37: REPRESENTAÇÃO DOS INTERVALOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA (LIMITE DE RESISTÊNCIA) PARA O AÇO 5115, 5140 E 5160 COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO – ESFERO1 E TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PROPOSTO – ESFERO2.	69
FIGURA 38: REPRESENTAÇÃO DOS INTERVALOS DA % DE ESTRICÇÃO PARA O AÇO 5115, 5140 E 5160, COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO – ESFERO1 E TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PROPOSTO – ESFERO2.	71
FIGURA 39: REPRESENTAÇÃO DOS INTERVALOS DO ALONGAMENTO PARA O AÇO 5115, 5140 E 5160, COMO RECEBIDO, SEM TRATAMENTO DE ESFEROIDIZAÇÃO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO – ESFERO1 E TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PROPOSTO – ESFERO2.	73
FIGURA 40: REPRESENTAÇÃO DOS INTERVALOS DO LIMITE DE ESCOAMENTO PARA O AÇO 5115, 5140 E 5160, COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO – ESFERO1 E TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PROPOSTO – ESFERO2.	74
FIGURA 41: REPRESENTAÇÃO DOS INTERVALOS DO GRAU DE ESFEROIDIZAÇÃO PARA O AÇO 5115, 5140 E 5160, TRATADOS TERMICAMENTE NOS CICLOS PADRÃO – ESFERO1, ESFERO2 E ESFERO3 E TRATADOS TERMICAMENTE NO CICLO PROPOSTO – ESFERO2.	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS DA FAMÍLIA 51XX.	23
TABELA 2: DUREZA APROXIMADA, ASSOCIADA AOS MICROCONSTITUINTES DO AÇO.	34
TABELA 3: EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL NA ESFEROIDIZAÇÃO DOS AÇOS.	37
TABELA 4: EVOLUÇÃO DA FRAÇÃO ESFEROIDIZADA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE TRATAMENTO PARA O AÇO SAE 10100;	39
TABELA 5: EVOLUÇÃO DA FRAÇÃO ESFEROIDIZADA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA DIFERENTES DEFORMAÇÕES OCORRIDAS DURANTE UM TRATAMENTO DE 12 HORAS.	40
TABELA 6: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS DA FAMÍLIA AISI 51XX UTILIZADOS NO TRABALHO.....	43
TABELA 7: DADOS DE DUREZA BRINELL (HB) PARA AS AMOSTRAS DOS AÇOS 5115, 5140 E 5160 NO ESTADO COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO CICLO PROPOSTO.	64
TABELA 8: DADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA (MPa) PARA AS AMOSTRAS DOS AÇOS 5115, 5140 E 5160 NO ESTADO COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO CICLO PROPOSTO.	69
TABELA 9: DADOS DE ESTRICÇÃO (%) PARA AS AMOSTRAS DOS AÇOS 5115, 5140 E 5160 NO ESTADO COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO CICLO PROPOSTO.	70
TABELA 10: DADOS DE ALONGAMENTO (MM) PARA AS AMOSTRAS DOS AÇOS 5115, 5140 E 5160 NO ESTADO COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO CICLO PROPOSTO.	72
TABELA 11: DADOS DE LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa) PARA AS AMOSTRAS DOS AÇOS 5115, 5140 E 5160 NO ESTADO COMO RECEBIDO, TRATADO TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO CICLO PROPOSTO.	74

1 INTRODUÇÃO

Os aços da família AISI 51XX são aços que têm como característica uma alta porcentagem de cromo em sua composição. A porcentagem de Cr varia de 0,70% e 1,20%. Dentre os aços da família 51XX serão estudados os aços 5115, 5140 e 5160. A aplicação desses aços é na indústria automobilística brasileira. Devido as propriedades mecânicas dos aços AISI 51XX e, dependendo da porcentagem de carbono, os aços se tornam interessantes para o uso em engrenagens, semi-eixos e molas helicoidais.

Os tratamentos térmicos são operações em que ocorre a transformação de fases nos metais, que têm por objetivo aumentar ou reduzir a dureza e as propriedades mecânicas, de acordo com a aplicação desejada para um determinado componente. As operações de tratamento térmico consistem em aquecimento até determinada temperatura, manutenção em temperatura por um certo tempo e resfriamento controlado, de acordo com as propriedades mecânicas requeridas. Muitas vezes, as operações de tratamento térmico são utilizadas em função de exigências de processamentos intermediários, como a conformação a frio, e podem ser realizadas novamente para definição das propriedades mecânicas finais do produto (BECKER, 2012).

Este tipo de processo, em geral, apresenta custos bastante elevados e baixa produtividade quando comparado a processos de conformação ou usinagem e, muitas vezes, é necessário mais de um tratamento térmico para que o produto atinja suas exigências finais. Com a grande concorrência existente hoje na indústria automobilística, a pressão por melhores custos vem reduzindo bastante as margens de toda a cadeia: produtores de aço, autopeças e montadoras. As importações de aço, de autopeças ou mesmo as diferenças no custo de produção em diferentes locais do mundo vem fazendo com que diversos projetos de redução de custos sejam desenvolvidos na cadeia automotiva em geral. Por este motivo, os tratamentos térmicos e os processos de conformação vêm sendo bastante estudados no intuito de aumentar produtividade via redução de tempos de ciclo, ou mesmo eliminação de etapas de tratamento térmico.

Para exemplificar esta concorrência, a partir de 1994 criou-se um consórcio entre mais de 30 siderúrgicas em 18 países para se desenvolver novas classes de aços, além das questões energéticas, há a preocupação também com as questões ambientais, redução de peso dos veículos, boa capacidade de absorção da energia de impacto, segurança e redução de gases e outras (BOOT, 2008).

Segundo Fagundes (2006), tratamento térmico é um ciclo de aquecimento e resfriamento realizado nos metais com o objetivo de alterar as suas propriedades físicas e mecânicas, sem mudar a forma do produto. O tratamento térmico é normalmente associado com o aumento da resistência do material, mas também pode ser usado para melhorar a usinabilidade, a conformabilidade e restaurar a ductilidade depois de uma operação a frio. Logo, o tratamento térmico é uma operação que pode auxiliar outros processos de manufatura e/ou melhorar o desempenho de produtos, aumentando sua resistência ou alterando outras características desejáveis. Os principais tipos de tratamento térmico são: recozimento, esferoidização, normalização, têmpera e revenimento. Podemos ainda incluir os tratamentos termoquímicos de cementação e nitretação, que melhoram o desempenho de componentes com relação ao desgaste, resistência à corrosão e à fadiga (Abdalla et al., 2007).

Os tratamentos térmicos de esferoidização constituem os maiores custos relacionados a esta operação por ser o tipo de tratamento térmico em que o material tem que permanecer maior tempo dentro dos fornos, para que se obtenha uma microestrutura globulizada, que tem excelente conformabilidade. A facilidade que o material tem de se conformar está diretamente relacionada à microestrutura antes da conformação, e a microestrutura esferoidizada, ou globulizada, é a ideal para muitos processos de deformação a frio onde se tem grande deformação em regiões localizadas.

De acordo com Plentz (2009), a resposta da microestrutura aos tratamentos térmicos de esferoidização pode ser melhorada com base em alteração da microestrutura prévia (obtida após a laminação do fio-máquina). Microestruturas como bainita e martensita, quando obtidas após a laminação termomecânica possibilitam o aumento da taxa de resfriamento dos ciclos de esferoidização, bem como a redução das temperaturas de patamar das curvas de tratamento térmico. Após os tratamentos térmicos de esferoidização os carbonetos esferoidizados obtidos são bastante finos, como resultado do aumento da taxa de resfriamento na esferoidização.

Este trabalho apresenta um estudo de otimização de ciclos de tratamento térmico de esferoidização baseado na influência das variáveis de tratamento térmico (temperaturas, tempos e taxas de resfriamento).

1.1 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é realizar o estudo de ciclos de tratamento térmico de esferoidização em aços com diferentes teores de carbono da família 51XX (5115, 5140 e 5160). Espera-se obter um ganho de produtividade unificando o tratamento térmico tradicional realizado nos três aços em um único ciclo de tratamento térmico, sem reduzir o desempenho e mantendo o grau de esferoidização exigido pela norma técnica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica devido a atual situação econômica do país, onde as indústrias de base, como a siderúrgica, do trabalho em questão e a automobilística estão em crise há mais de 3 anos. Este fato provocou uma redução, na produção e comercialização, para níveis praticados há cerca de 10 anos atrás. Desta forma, tornou importantíssimo reduzir os custos de produção para manter a empresa sustentável economicamente e competitiva frente aos concorrentes. O custo do tratamento térmico neste estudo é de mesma magnitude do custo observado no processo de laminação do material, isso justifica a análise de ciclos de tratamento térmico e a otimização dos mesmos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO E SIDERURGIA

O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0,008 e 2,11%. Distingue-se do ferro fundido, que também é uma liga de ferro e carbono, mas com teor de carbono entre 2,11% e 6,67%. O carbono é um material muito usado nas ligas de ferro, porém, além deste elemento, podemos encontrar outros como: magnésio, cromo, vanádio e tungstênio, etc. O carbono e outros elementos químicos agem de diversas formas, contribuindo para modificar as propriedades do aço. A diferença fundamental entre o ferro fundido e os aços é que o aço, pela sua ductibilidade, é facilmente deformável por forja, laminação e extrusão, enquanto que uma peça em ferro fundido é muito frágil. O aço pode ser classificado da seguinte maneira (CHIAVERINI, 2008):

- Quantidade de carbono em porcentagem;
- Composição química;
- Quanto à constituição da microestrutura;
- Quanto à sua aplicação.

Além dos componentes principais indicados, o aço incorpora outros elementos químicos, alguns prejudiciais, provenientes da sucata, do mineral ou do combustível empregado no processo de fabricação, como o enxofre e o fósforo. Outros são adicionados intencionalmente para melhorar algumas características do aço para aumentar a sua resistência, ductibilidade, dureza ou outra, ou para facilitar algum processo de fabricação, como a usinabilidade, é o caso de elementos de liga como o níquel, o cromo, o molibdênio e outros.

No aço comum o teor de elementos de liga (elementos além do ferro e do carbono) estará sempre abaixo dos 2%. Acima dos 2 até 5% de outros elementos já pode ser considerado um aço de média-liga, acima de 5% é considerado de alta-liga. O enxofre e o fósforo são elementos prejudiciais ao aço pois acabam por intervir nas suas propriedades físicas, deixando-o frágil. Dependendo das exigências, o controle sobre as impurezas pode ser menos rigoroso, ou então, podem pedir o uso de um antissulfurante como o magnésio e outros elementos de liga benéficos às propriedades do aço. Existe uma classe de aços carbono, conhecida como aços de fácil usinabilidade, que contém teores mínimos de fósforo e enxofre. Estes dois elementos proporcionam um corte melhor das ferramentas

de usinagem, promovendo a quebra do cavaco e evitando a aderência do mesmo na ferramenta. Estes aços são utilizados quando as propriedades de usinabilidade são prioritárias, em relação as propriedades mecânicas e microestruturais, (peças de baixa responsabilidade).

Uma outra classe importante de aços são os aços inoxidáveis. Estes são aços de alta-liga com teores de cromo e de níquel em altos teores (que ultrapassam 20%). Os aços inoxidáveis podem ser divididos em três categorias principais: aços inoxidáveis austeníticos, os quais contém elevados teores de cromo e níquel, os aços inoxidáveis martensíticos, que contém elevado teor de cromo, com baixo teor de níquel e teor de carbono suficiente para se alcançar durezas médias ou altas no tratamento térmico de têmpera, e os aços inoxidáveis ferríticos, que contém elevado teor de cromo e baixos teores de níquel e carbono. Este último e o tipo austenítico não podem ser temperados. (SILVA, 2006)

O aço é atualmente a mais importante liga metálica, sendo empregue de forma intensiva em numerosas aplicações tais como máquinas, ferramentas, em construção, etc. Entretanto, a sua utilização está condicionada a determinadas aplicações devido a vantagens técnicas que oferecem outros materiais como o alumínio no transporte, principalmente aéreo, por sua maior leveza e na construção por sua maior resistência a corrosão, o cimento (mesmo combinado com o aço) pela sua maior resistência ao fogo e a cerâmica em aplicações que necessitem de elevadas temperaturas. Tal é a importância industrial deste material que a sua metalurgia recebe a denominação especial de siderurgia, e a sua influência no desenvolvimento humano foi tão importante que uma parte da história da humanidade foi denominada Idade do Ferro, que se iniciou em 3500 a.C., e que, de certa forma, ainda perdura (CAIO, 2011).

2.1.1 Classificações de usinas siderúrgicas

As usinas de aço do mundo são classificadas segundo o seu processo produtivo como:

- * Integradas – que operam as três fases básicas: redução, refino e laminação; participam de todo o processo produtivo e produzem aço; e
- * Semi-integradas - que operam duas fases: refino e laminação. Estas usinas partem de ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquiridas de terceiros para transformá-los em aço em aciarias elétricas e sua posterior laminação.

2.1.2 Processo siderúrgico

O aço é uma liga de ferro e carbono. O ferro é encontrado em toda crosta terrestre, fortemente associado ao oxigênio e à sílica. O minério de ferro é um óxido de ferro, misturado com areia fina. O carbono é também relativamente abundante na natureza e pode ser encontrado sob diversas formas. Na siderurgia, usa-se carvão mineral, e em alguns casos, o carvão vegetal. O carvão exerce duplo papel na fabricação do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1.500 °C), necessárias à fusão do minério. Como redutor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono chama-se redução e ocorre dentro de um equipamento chamado alto forno.

Antes de serem levados ao alto forno, o minério e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia do processo. O minério é transformado em pelotas e o carvão é destilado, para obtenção do coque, dele se obtendo ainda subprodutos carboquímicos. No processo de redução, o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como calcário, sílica, etc., formam a escória, que é matéria-prima para a fabricação de cimento. Esse processo pode ser visto, de forma esquemática, na Figura 1.

Figura 1: Esquema ilustrativo da operação de um Alto-forno.



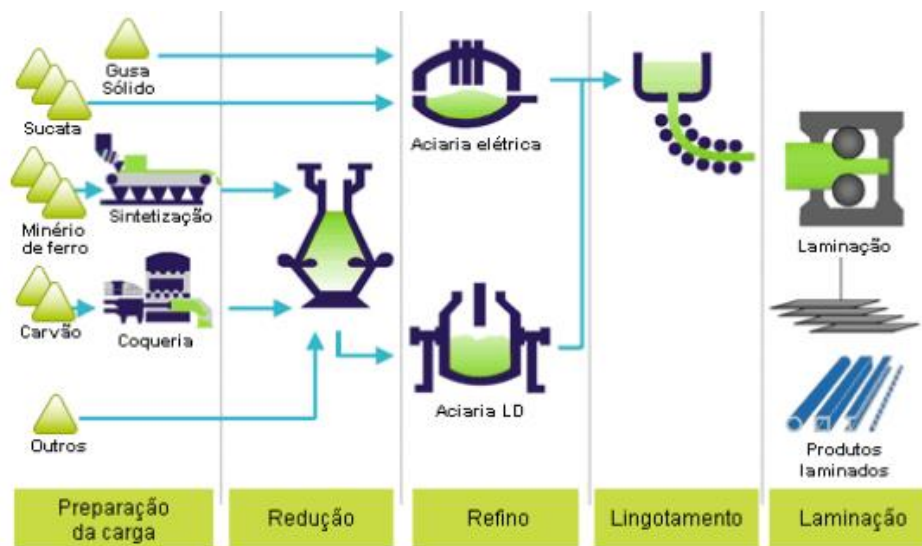
Fonte: AURÉLIO, 2008

A etapa seguinte do processo é o refino. O ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço, mediante eliminação de impurezas e adições. O refino do aço se faz em fornos a oxigênio ou elétricos. Finalmente, a terceira

fase clássica do processo de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras etc.

Com a evolução da tecnologia, as fases de redução, refino e laminação estão tendo o seu tempo reduzido, assegurando maior velocidade na produção. A Figura 2 mostra o fluxo simplificado de produção.

Figura 2: Fluxo simplificado de produção em uma usina siderúrgica.



Fonte: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>

2.1.3 Aços especiais

Segundo Silva (2006), a produção mundial de aço bruto, apresenta-se relativamente estável, da ordem de 750 milhões de toneladas/ano nesta década, após ter atingido cerca de 780 milhões de toneladas/ano em fins da década de 80. Entretanto, a produção de aços especiais, que atualmente é de cerca de 57 milhões de toneladas, representando cerca de 7,6% da produção siderúrgica, tem evoluído a taxas superiores às dos aços comuns.

Verifica-se, portanto, uma tendência de crescimento da produção de diversos tipos de aços especiais, como consequência do desenvolvimento pela indústria de bens de consumo duráveis de produtos mais leves, porém, com características de desempenho superiores, o que requer, frequentemente, o uso de materiais especiais em sua construção.

Aços especiais são os aços que pelo seu percentual de carbono ou pela adição de elementos de liga, principalmente metálicos, apresentam propriedades específicas em

termos de resistência mecânica, à corrosão e características eletromagnéticas. Assim como nos aços comuns, os aços especiais podem ser planos ou longos.

2.1.3.1 Aços Especiais Longos

Os aços especiais longos apresentam enorme gama de tipos em função das propriedades físicas e químicas requeridas. São geralmente comercializados sob as formas de blocos, tarugos, barras, fio-máquina, arames e tubos. Para fins de estudos, podem ser classificados em quatro tipos básicos:

2.1.3.2 Aços para Construção Mecânica

São aços que contêm carbono até 0,5% e/ou outros elementos de liga como silício, manganês, cromo e molibdênio, de forma a melhorar suas características de resistência mecânica. Os aços para construção mecânica são classificados por vários critérios como composição química, tratamento térmico a ser submetido e aplicação final dos produtos. Os principais tipos de aços são: microligados, para tratamento térmico, para forjados, para molas, para porcas e parafusos e para rolamentos. Estima-se que cerca de 90% dos aços para construção mecânica destina-se à indústria automobilística e de autopeças. As indústrias ferroviária, implementos agrícolas e de artigos de uso doméstico seriam as demais usuárias. (SILVA, 2006)

2.1.3.3 Aços de Alta-Liga

Estes aços contêm elementos de liga como cromo, níquel, molibdênio, vanádio, tungstênio e cobalto, adquirindo propriedades de dureza e resistência mecânica, entre outras, necessárias à fabricação de ferramentas de usinagem, estampos, moldes e matrizes, válvulas e outros produtos. Os principais tipos são: aço ferramenta, aço rápido, aço inoxidável, aço válvula e superligas.

Os aços ferramenta podem ser para trabalho a frio e a quente. As principais características do aço ferramenta para trabalho a frio são: alta resistência a abrasão, alta tenacidade, elevada retenção de corte, alta resistência ao choque e grande estabilidade dimensional. No caso dos aços para trabalho a quente, as principais características são: elevada resistência mecânica a quente, boa resistência à abrasão em temperaturas elevadas, boa condutibilidade térmica e elevada resistência à fadiga. Os aços rápidos são aços ferramenta utilizados para fabricação de ferramentas de corte.

Os aços inoxidáveis longos destinam-se a diversos usos onde se necessite material não corrosivo, tais como indústrias de alimentos, bebidas e hospitalar. Os aços válvula são inoxidáveis destinados, especificamente, para a produção de válvulas de motores a combustão. As superligas são ligas nobres, principalmente à base de níquel, feitas sob encomenda, para utilização em resistências elétricas, eletrodos de vela de automóvel, implantes cirúrgicos, entre outros.

2.2 FAMÍLIAS DE AÇOS – CLASSIFICAÇÃO SAE e AISI

A classificação normativa SAE é a classificação dos aços segundo as normas da SAE (Society of Automotive Engineers - EUA), a mais utilizada em todo o mundo para aços-carbono (aços sem adição de elementos de liga, além dos que permanecem em sua composição no processo de fabricação) e aços de baixa liga (aços com baixas porcentagens de elementos de liga). A classificação SAE é baseada na composição química do aço. A cada composição normalizada pela SAE corresponde a uma numeração com 4 ou 5 dígitos. A mesma classificação também é adotada pela AISI (*American Iron and Steel Institute*-EUA).

No total são previstas muitas dezenas de classificações. Nelas, os 2 dígitos finais XX indicam os centésimos da porcentagem de C (Carbono) contida no material, podendo variar entre 05, que corresponde a 0,05% de C, a 95, que corresponde a 0,95% de C. Se a porcentagem de C atinge ou ultrapassa 1,00%, então o final tem 3 dígitos (XXX) e a classificação tem um total de 5 dígitos. Um extrato contendo exemplos das classificações de alguns aços mais comuns é apresentado na listagem a seguir.

1. SAE 1XXX – aço-carbono simples
2. SAE 2XXX – aço-Níquel
3. SAE 3XXX – aço-Níquel-Cromo
4. SAE 4XXX – aço-Molibdênio
5. SAE 5XXX – aço-Cromo
6. SAE 6XXX – aço-Cromo-Vanádio
7. SAE 7XXX – aço-Cromo-Tungstênio
8. SAE 8XXX – aço-Níquel-Cromo-Molibdênio
9. SAE 92XX – aço-Silício-Manganês

10. SAE 93XX, 94XX, 97XX e 98XX – aço-Níquel-Cromo-Molibdênio

2.2.1 Família 51XX

A seguir será apresentada a família de aços AISI 51XX pois é a família que será estudada neste trabalho. Os aços da família 51XX são aços que tem como característica uma alta porcentagem de cromo em sua composição. A porcentagem de Cr varia de 0,70% e 1,20%.

Tabela 1: Composição química dos aços da família 51XX.

Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
1,00 - 1,30	0,035	0,035	0,40	-	0,80 - 1,10	-

Fonte: Gerdau.

Aços ao carbono de baixo e médio carbono são preferencialmente utilizados nas condições típicas de como vem da siderúrgica, ou seja, com a estrutura de um aço trabalhado a quente e resfriado ao ar. Aços de alto carbono que é o caso do aço AISI 5140, contendo elementos de liga (aços liga): são em geral submetidos a tratamentos térmicos antes de serem colocados em serviço.

2.2.1.1 AISI 5115 – DIN 16MnCr5

O aço AISI 5115 é um aço de média temperabilidade, boa usinabilidade, boa soldabilidade e média resistência mecânica. Amplamente utilizado na fabricação de engrenagens, pinos e peças onde há exigência de dureza superficial obtida pelo processo de cementação ou carbonitreção. Na Figura 3 encontra-se a representação de uma engrenagem, importante produto obtido utilizando o aço 5115.

Figura 3: Engrenagem produzida a partir do aço 5115.



Fonte: www.manutencaoesuprimentos.com.br

2.2.1.2 AISI 5140 – DIN41Cr4

Os aços do tipo AISI 5140 estão entre os principais aços utilizados em ferramentas. O aço 5140 tem alta dureza no estado temperado e retenção da dureza a temperaturas em que o gume cortante da ferramenta se torna vermelho. Apresenta média temperabilidade, é um aço de alto teor de silício e alta resistência. É usado em molas, parafusos, semi-eixos, pinos, etc. Abaixo a representação de um semi-eixo, importante produto obtido utilizando o aço 5140.

Figura 4: Semi-eixo - produto fabricado utilizando o aço 5140.



Fonte: www.allpartsnet.com.br

2.2.1.3 AISI 5160

O aço AISI 5160 possui alta temperabilidade e boa ductilidade. Na condição beneficiada apresenta alta resistência mecânica e boa resistência à fadiga. Amplamente utilizado na fabricação de eixos automotivos, pinos, fixadores, molas planas, molas semi-

elípticas e helicoidais lâminas de corte, etc. Abaixo a representação de vários tipos de molas, importante produto obtido utilizando o aço 5160.

Figura 5: Molas para automóveis produzidos com o aço AISI 5160.

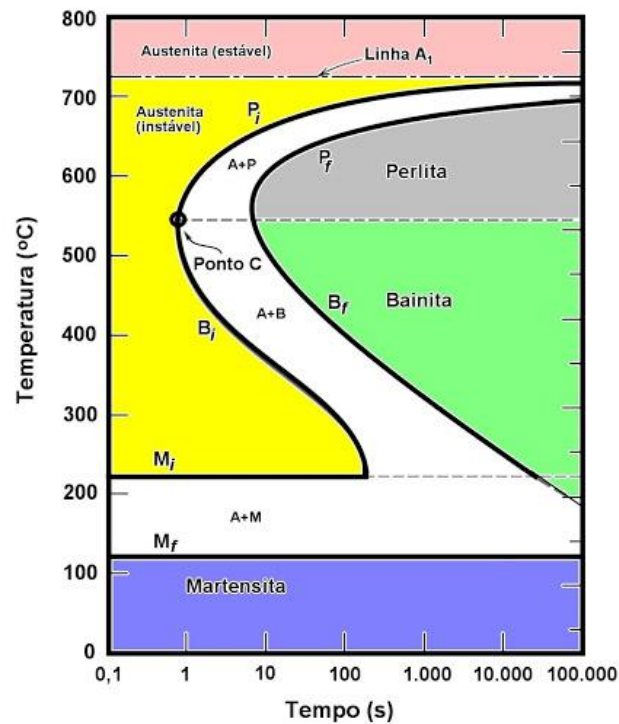


Fonte: <http://www.rassini-nhk.com.br/>

2.3 CURVAS TTT e RC

Para descrever o que ocorre durante o resfriamento dos aços submetido a tratamentos isotérmicos, utilizam-se as curvas TTT – Temperatura, Tempo, Transformação. São diagramas que relacionam as temperaturas e os tempos de início e fim de transformação. É possível localizar nas curvas as regiões em que se formam ferrita, perlita, bainita e martensita. Na Figura 6 é apresentado o diagrama TTT para o aço 1080.

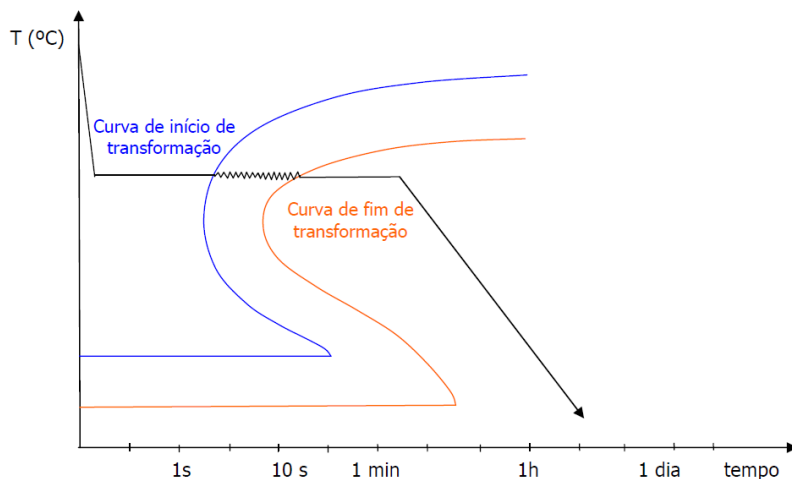
Figura 6: Diagrama TTT do aço 1080.



Fonte: <http://www.knifenetwork.com>.

Na Figura 07 a curva mais à esquerda (azul) corresponde ao início das transformações e a mais à direita (cor de laranja) ao fim das transformações. Nas duas curvas existem duas retas horizontais denominadas respectivamente M_i e M_f. São as temperaturas de início e fim da transformação martensítica. Na Figura 7 observa-se que quando uma curva de resfriamento cruza a curva TTT a transformação ocorre na região assinalada por um serrilhado. A determinação da estrutura final é feita analisando-se em região da curva TTT ocorreu a transformação durante o resfriamento.

Figura 7: Representação gráfica de uma transformação térmica em uma curva TTT.



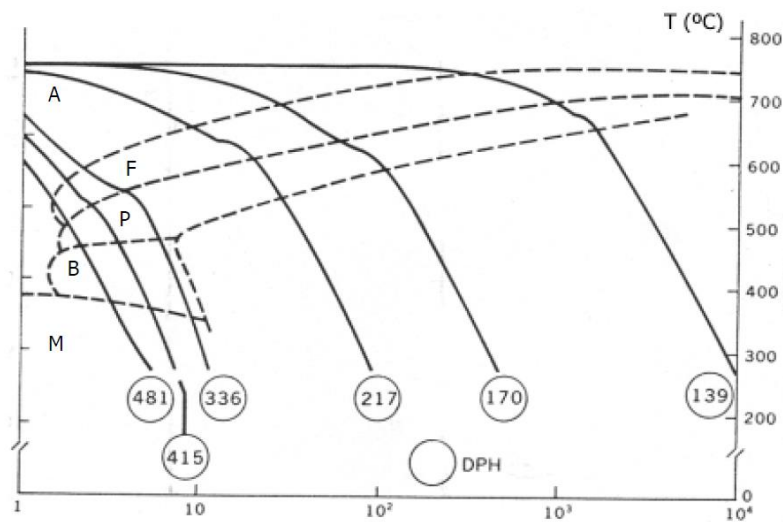
Fonte: ANDRÉ, 2014

É importante também conhecer as curvas CCT (*Continuous Cooling Transformation*), Transformação com Resfriamento Controlado, diferem das curvas TTT (*Time Temperature Transformation*), pois apresentam um resfriamento contínuo, podendo este resfriamento ocorrer no interior do forno ou não. Acontecem as mesmas transformações verificadas no diagrama TTT, porém em tempos e temperaturas distintos. Os diagramas que representam transformações contínuas são denominados CCT e, em muitos casos, são mais representativos das condições de resfriamento utilizadas na prática.

Segundo André 2014, para tratamentos térmicos industriais, em que raramente as temperaturas são mantidas constantes, e as peças são continuamente resfriadas desde a temperatura de austenitização até a temperatura ambiente, utilizam-se curvas de resfriamento contínuo que descrevem as transformações em resfriamento contínuo.

A Figura 8 apresenta uma série de 6 curvas de resfriamento superpostas à curva RC (Resfriamento Contínuo). Os números indicados correspondem à dureza Vickers alcançada após cada um dos tratamentos térmicos indicados. As fases formadas são indicadas pelas letras: A – austenita, B – Bainita, F – Ferrita, M – Martensita e P – Perlita.

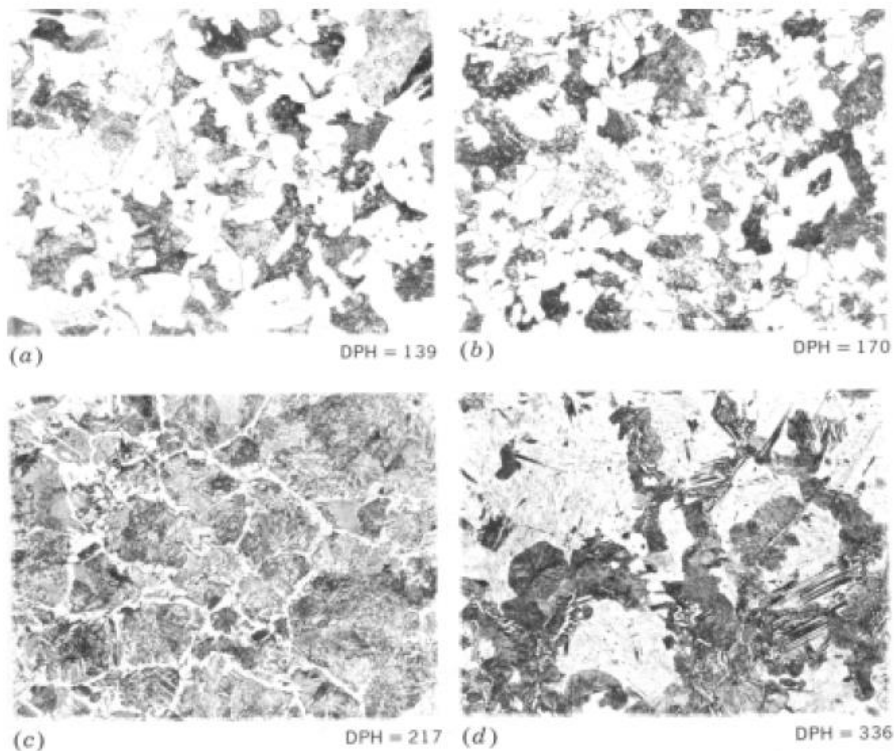
Figura 8: Diferentes curvas de resfriamento controlado.

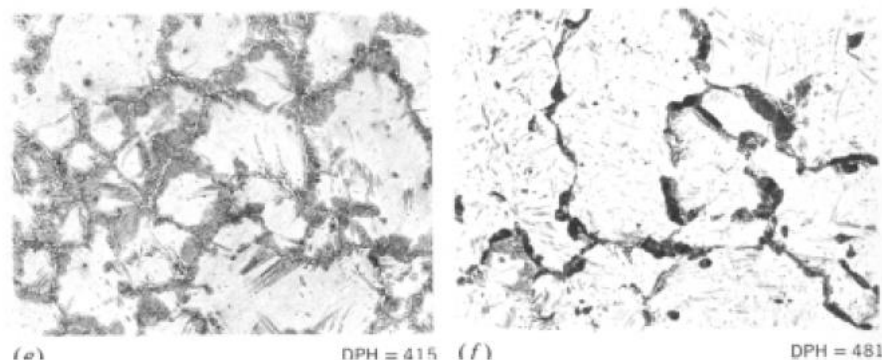


Fonte ANDRÉ, 2014.

As micrografias da Figura 9 mostram os microconstituintes formados e as diferentes durezas adquiridas pelo aço em função da velocidade de resfriamento, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 9: Microestruturas formadas em consequência das seis velocidades de resfriamento indicadas na figura 8. Os números DPH são as durezas Vickers de cada estrutura.





Fonte ANDRÉ, 2014.

Pode-se perceber que a dureza do aço aumenta à medida que ele é resfriado mais rapidamente. Isso ocorre devido a formação da martensita, que é a fase conhecida por aumentar a dureza dos aços por causa de sua estrutura tetragonal.

2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

Baseado nas curvas TTT e RC esperadas para cada tipo de aço são programados os tratamentos térmicos. Estes têm por finalidade produzir uma microestrutura específica que fornecerá as propriedades mecânicas mais adequadas para um determinado tipo de aplicação.

2.4.1 Tratamento térmico de recozimento

Em consequência dos processos de fabricação, as barras, chapas ou tarugos de aço podem acumular tensões e apresentar microestruturas heterogêneas com exagerado tamanho de grão e dureza elevada. O recozimento pleno é feito com o objetivo de reduzir ao máximo a dureza do aço. Por meio do recozimento pleno é possível aumentar a ductilidade e a usinabilidade do aço, além de controlar seu tamanho de grão. Utiliza-se este tratamento quando na sequência de fabricação o aço deve sofrer elevado grau de deformação ou a peça deve ser usinada. O recozimento pleno garante ductilidade a peças que em outras circunstâncias apresentariam comportamento frágil (CHIAVERINI, 2008).

Quando metais laminados a frio são tratados termicamente, dois processos, recuperação e recristalização, competem pela energia armazenada no trabalho a frio. A recristalização é definida como a re-orientação de cristais em um corpo sólido pela migração de contornos de alto ângulo. A recuperação é um termo geral aplicado a todas

as outras mudanças que reduzem a energia armazenada de deformação (CHIAVERINI, 2008).

Conforme Leslie (1982), no ferro esta energia armazenada é usualmente na faixa de 20 a 40 J/mol, ou cerca de 2 a 4% da energia do trabalho a frio. Durante a recuperação, apenas as imperfeições de maior mobilidade participam do processo de recondução parcial do metal a uma estrutura menos distorcida. As lacunas e átomos intersticiais existentes nas faixas de escorregamento são eliminadas bem como discordâncias de sinais contrários. O maior efeito destas pequenas modificações estruturais é o de diminuir as tensões internas produzidas pela deformação, sendo mais pronunciado para temperaturas mais altas e tempos mais longos.

2.4.1.1 Recristalização durante o recozimento

Conforme Luciano (2006), quando um material cristalino é deformado, sua dureza aumenta à medida que as discordâncias se tornam mais entrelaçadas, e a sua ductilidade diminui. Se o material é aquecido a uma temperatura relativamente elevada, as discordâncias de sinais contrários começam a se cancelar mutuamente; os defeitos pontuais desaparecem, e propriedades físicas, tais como a resistência mecânica, voltam a ter valores próximos aos do metal sem deformação. Este processo é chamado recuperação. A microestrutura, se mantém inalterada até que, em uma temperatura mais alta, os grãos alongados se transformam em grãos finos e equiaxiais, e a dureza e a ductilidade voltam a ter valores próximos dos originais. Esta nucleação de grãos novos, sem deformação, em um material deformado, se chama recristalização e prossegue até que toda a peça seja formada de grãos novos. Uma deformação feita abaixo da temperatura de recristalização é denominada trabalho a frio. Se a deformação é feita acima da temperatura de recristalização, será um trabalho a quente. Um material trabalhado a quente não encrua, porque a recristalização pode ocorrer simultaneamente à distorção e neutralizar seus efeitos.

A temperatura de recristalização de um material depende de uma série de variáveis; ela diminui com o aumento do encruamento prévio, com o aumento da pureza do material, do tempo de aquecimento, do tamanho inicial do grão, e com a diminuição da temperatura do trabalho a frio. O tamanho de grão após recristalização depende do grau de encruamento antes da recristalização, da temperatura e do tempo de permanência na temperatura de recristalização.

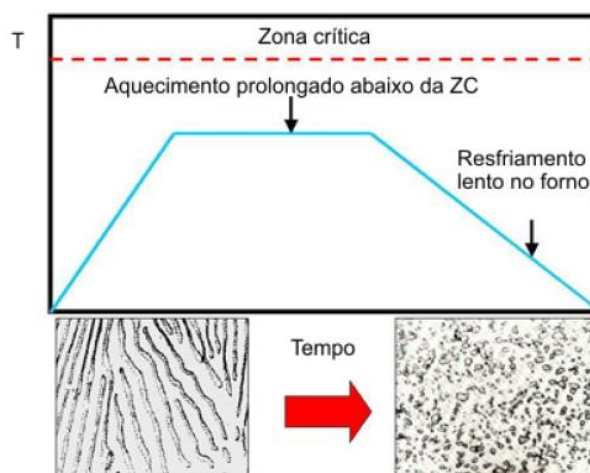
A recristalização exige um encruamento prévio. Já o crescimento de grão, não. Qualquer agregado de cristais de granulação fina quer tenha sido processado por recristalização, sinterização ou algum outro processo, aumentará seu tamanho de grão quando aquecido a uma temperatura elevada; a “força impulsora” deste crescimento de grão é a redução de energia superficial pela redução da área de contorno de grão. Quanto mais alta a temperatura, mais rápido será o crescimento de grão.

2.4.2 Esferoidização

A esferoidização é um processo normalmente aplicado em aços hipereutetóides e aços ligados. Nestes aços, a perlita é envolvida por uma rede de cementita que dificulta trabalhos de usinagem e outros processos de fabricação. O tratamento consiste em aquecer e manter por um longo tempo o material em temperaturas um pouco abaixo da formação da austenita e resfriar em tempos controlados (ERDAL, 2007). O resultado é uma estrutura globular de cementita em uma matriz de ferrita, o que facilita a usinagem e outros trabalhos. Esta estrutura é denominada esferoidita, e um aspecto micrográfico típico é mostrado na parte direita da Figura 10.

Os carbonetos adquirem a forma esférica durante o coalescimento para minimizar a relação entre a energia livre de superfície e a volumétrica, reduzindo a energia total do sistema (BROOKS, 2000). Em função do ciclo térmico do processo de esferoidização pode haver variações no tamanho e distribuição dos carbonetos e no tamanho de grão ou sub grão da ferrita que podem alterar significativamente a ductilidade e consequentemente, a conformabilidade dos aços, (SYN e SHERBY, 1994).

Figura 10: Desenho esquemático mostrando o tratamento térmico de esferoidização e a estrutura de esferoidita formada após o tratamento.



Fonte: ERDAL, 2007.

Aços de alto carbono, quando necessitam ser usinados ou conformados mecanicamente, apresentam dureza elevada no estado normalizado ou possibilidade de ter carbonetos nos contornos de grão após recozimento, tornando-os frágeis. Aços médio carbono, quando necessitam máxima ductilidade para trabalhos que exigem muito esforço, tanto da ferramenta quanto do material, também devem ser esferoidizados. A esferoidização aumenta a vida das ferramentas e facilita as operações de conformação mecânica e usinagem.

2.4.2.1 Recozimento de esferoidização

O recozimento de esferoidização é aplicado aos aços de médio e alto teor de carbono com o objetivo de obter-se uma microestrutura composta por partículas aproximadamente esféricas de cementita em matriz ferrítica, (THELNING, 1984), com a finalidade de melhorar a usinabilidade; melhorar a ductilidade, a conformabilidade e, desenvolver uma estrutura apta a receber os tratamentos térmicos de endurecimento que, posteriormente, serão realizados.

A esferoidização é um processo de ajuste morfológico que se dá sob a ação da energia superficial, onde ocorre uma evolução microestrutural da perlita pelo mecanismo de coalescimento, com consequente formação de carbonetos globulares em uma matriz ferrítica.

Partículas de cementita lamelar, presentes na perlita, têm uma área de superfície por unidade de volume de partícula muito grande e, portanto, uma elevada energia interfacial. A fim de reduzir esta energia as lamelas de cementita ou placas se quebram em pequenas partículas que eventualmente assumem forma esférica. Uma vez quebrada as lamelas, as menores partículas esféricas se dissolvem à custa do crescimento das maiores, novamente em função da redução da energia interfacial.

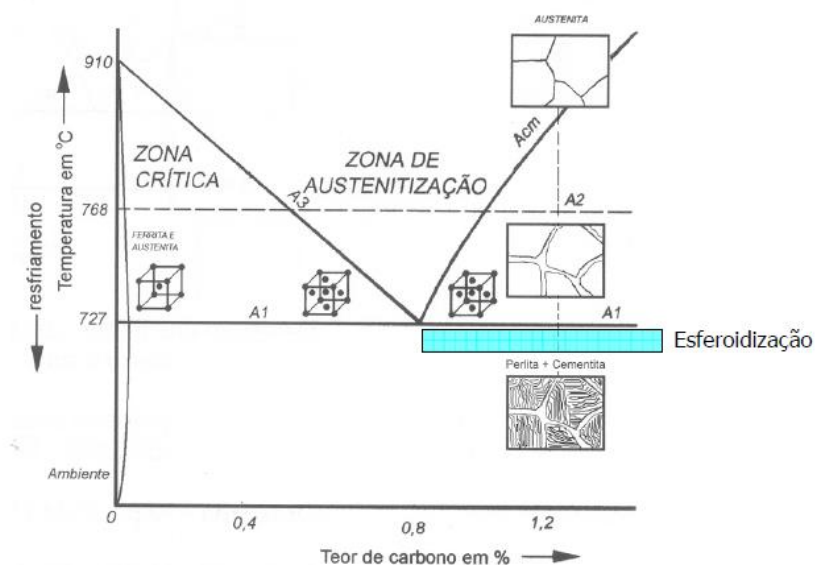
Pode-se demonstrar que a taxa de esferoidização está diretamente relacionada com a difusão do carbono na ferrita e que a mesma decresce com o crescimento do tamanho médio da partícula. Elementos de liga diminuem a taxa de difusão de carbono na ferrita (coeficiente de difusão) e, portanto, a taxa do processo de esferoidização. Se o aço contiver elementos formadores de carbonetos, ocorre o mesmo efeito, reduzindo fortemente a taxa de esferoidização. A esferoidização das partículas de cementita presentes na perlita tem um efeito determinante no resultado de propriedades mecânicas dos aços médio carbono. Quando uma estrutura perlítica lamelar é substituída por uma

estrutura ferrítica com esferóides de carbonetos, nota-se uma significativa modificação nas propriedades mecânicas desse produto. Esta nova estrutura irá conferir ao aço propriedades, que proporcionarão ao material uma maior facilidade na conformação de peças trabalhadas a frio, fabricadas a partir daquele material.

Existem várias técnicas que são utilizadas para o tratamento de esferoidização que permitem obter uma estrutura com carbonetos esferoidizados. Partindo-se por exemplo, de uma estrutura essencialmente perlítica, aquecida nas proximidades da linha de transformação A1 do diagrama ferro carbono, obtém-se a estrutura esferoidizada.

Com relação às temperaturas que são normalmente utilizadas para o processo de recozimento de esferoidização, a Figura 11 apresenta parte do diagrama de equilíbrio ferro-carbono onde as linhas horizontais próximas à temperatura A1, evidenciam os limites inferiores e superiores da faixa para esferoidização.

Figura 11: Diagrama de fases ferro-carbono evidenciando a faixa de temperatura utilizada para o recozimento de esferoidização. (A1 – temperatura eutetóide, A3 e Acm temperaturas críticas para os aços hipo e hipereutetóides).



Fonte: Metals Handbook, (1994).

A Tabela 2 permite diferenciar as diferentes durezas encontradas nas diferentes fases dos aços, a cementita endurece o aço e a ferrita o mantém tenaz. Já a perlita apresenta uma dureza intermediária entre a ferrita e a cementita.

Tabela 2: Dureza aproximada, associada aos microconstituintes do aço.

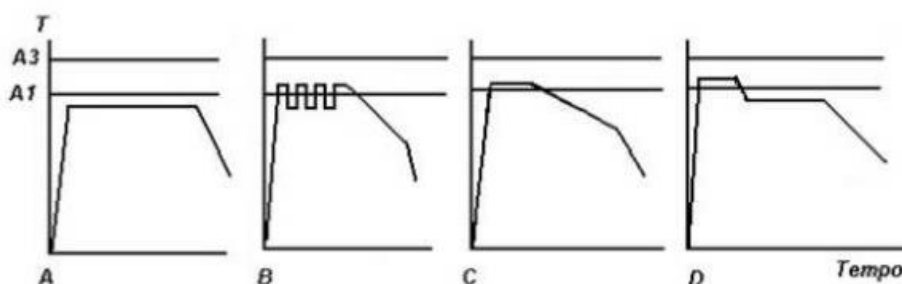
Microconstituente	Dureza (HV)
Ferrita ($\text{Fe-}\alpha$)	90
Cementita (Fe_3C)	1050
Perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)	230

Fonte: o autor.

2.4.2.2 Ciclos térmicos de esferoidização

De um modo geral, para o processo de esferoidização dos aços pode-se utilizar os ciclos térmicos apresentados na Figura 12 (ROSSI et al, 1983), posteriormente, serão comentados, brevemente, cada um dos tipos de ciclos propostos para a esferoidização.

Figura 12: Ciclos térmicos utilizados para o processo de recozimento de Esferoidização.



Fonte: Rossi. Cotinho. (1983).

- A - Recozimento Sub-crítico: neste tratamento o aço é aquecido a temperatura um pouco abaixo de A1, permanecendo nesta temperatura por um longo período de tempo. Não ocorrendo mudanças de fase para este ciclo.
- B - Recozimento Pendular: este processo consiste em alterar a temperatura várias vezes em torno da linha A1, com posterior resfriamento lento. A cada vez que se sobe a temperatura acima de A1 os carbonetos mais finos dissolvem-se, e quando se abaixa a temperatura, ocorre a precipitação na cementita que não se dissolveu.
- C - Resfriamento Controlado: o material é aquecido até uma temperatura 10 a 30°C acima de A1, permanecendo nesta temperatura por determinado tempo, sendo posteriormente resfriado lentamente. Este ciclo visa propiciar uma dissolução incompleta da cementita em temperaturas de 10 a 30°C acima de A1.

Durante o resfriamento, as partículas de cementita não dissolvidas atuam como núcleo para o crescimento dos carbonetos esferoidizados.

- D - Recozimento Isotérmico: consiste em aquecer o aço até uma temperatura entre A1 e A3, mantendo-se nesta temperatura por um curto intervalo de tempo e após resfriar até uma temperatura ligeiramente inferior a A1, mantendo-se nesta temperatura por um tempo suficiente para que ocorra a transformação de toda a austenita existente e se obtenha um coalescimento suficiente da cementita. Neste caso, o resfriamento não precisa ser tão lento, porém costuma-se resfriar lentamente até próximo de 650°C com posterior resfriamento rápido até a temperatura ambiente.

Em virtude do ciclo térmico e da microestrutura prévia influenciarem a cinética de esferoidização, vários processos (AIAHA, 1990), têm-se desenvolvidos para acelerar este recozimento, de maneira a reduzir o tempo de tratamento. Como exemplo pode-se citar as técnicas alternativas utilizadas atualmente em siderúrgicas, onde obtêm-se estruturas de mais fácil esferoidização direto da linha de laminação, através de resfriamento controlado. Os tratamentos termomecânicos (TTM) têm sido muito estudado com este objetivo.

2.4.2.3 Etapas de esferoidização da cementita da perlita

Pode ser previsto pelo diagrama de equilíbrio ferro-carbono que, quando se resfria a austenita a uma temperatura imediatamente abaixo de 727°C, com uma composição definida de aproximadamente 0,8% de carbono, ocorrerá a reação de transformação da austenita em uma estrutura 100% perlítica. As fases estáveis abaixo da temperatura de 727°C (temperatura eutetóide) são a ferrita e a cementita, sendo o constituinte resultante, uma mistura dessas duas fases, denominado perlita, que é formado por lamelas alternadas de carbonetos (cementita) e ferrita.

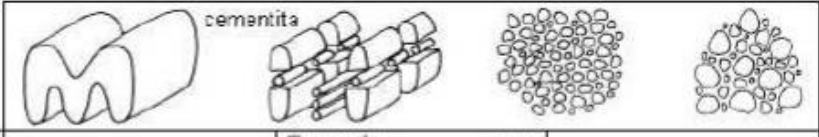
A necessidade de se conseguir, para determinados processos subseqüentes, um aço com baixo nível de segregação e impurezas, como também um tratamento térmico adequado que permita uma estrutura de carbonetos uniformemente distribuídos em uma matriz ferrítica, o que pode ser desejado em alguns produtos, leva a uma tentativa de modificação desta estrutura lamelar. Na estrutura substituta, deseja-se que os carbonetos tenham a forma aproximadamente esférica, estejam distribuídos na matriz ferrítica, esta estrutura é chamada de esferoidizada.

A esferoidização da cementita pode ser dividida em três etapas, em função de suas características morfológicas. Na primeira etapa ocorre a fragmentação das lamelas, as quais são transformadas em partículas grosseiramente esféricas, aumentando o número de partículas isoladas de cementita. Na segunda etapa, o fator de forma dos fragmentos das lamelas tende progressivamente a um formato teoricamente esférico. Na terceira etapa, que pode ser denominada de coalescimento, ocorre o crescimento de partículas em função do tempo e da temperatura, com consequente diminuição do número de partículas esferoidizadas e aumento da distância entre elas.

Pode-se ainda incluir uma quarta etapa, a qual refere-se a grafitização. Nesta etapa, há a formação de nódulos de grafita na microestrutura, geralmente quando o aço é mantido por longos períodos de tempo em temperaturas subcríticas. Nestes casos, além da cementita esferoidizada, encontram-se também nódulos de grafita de formatos irregulares. Este fato ocorre devido a grafita ser termodinamicamente mais estável que a cementita (NERI, 1998). A grafitização, também ocorre algumas vezes em aços de alto carbono laminados e posteriormente recozidos por tempos em torno de 80 horas, ou em situações em que o material fique exposto por longos períodos em temperatura próxima à subcrítica, como em tubulações de caldeiras (NERI, 1998).

Na Tabela 3 são mostradas, de modo esquemático, algumas características do processo e esferoidização para um aço com 0,8% de carbono. A microestrutura inicial se apresenta composta totalmente por perlita que, com a evolução do processo, fragmenta-se formando unidades menores que tendem a se arredondar, ou seja, há a formação de uma microestrutura com morfologia esferoidizada, (CUNHA, 1994).

Tabela 3: Evolução microestrutural na esferoidização dos aços.

			
ESTRUTURAS	Unidades perlíticas contínuas ou dispersas na matriz	Cementita com geometria de complexidade variável, como resultado da quebra das lamelas de cementita da perlita em unidades menores	Cementita globular numa matriz ferrítica
FORÇA MOTRIZ	Equilíbrio de tensões de superfície entre ferrita/cementita e energia de interface ferrita-cementita		Energia de interface ferrita-cementita
PROCESSO	Global: processo de redistribuição, esferoidização, coalescimento		
	Primeira e segunda etapa: esferoidização propriamente dita		Terceira etapa: coalescimento

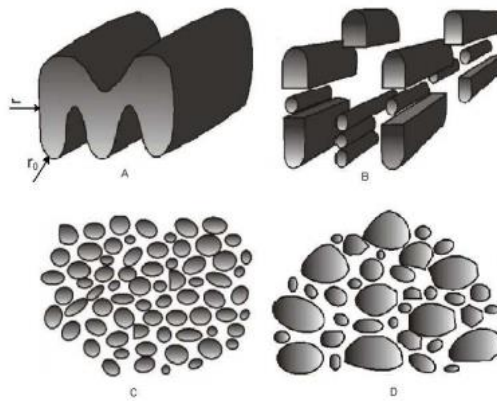
Fonte: Cunha (1994).

O processo de esferoidização é induzido por fatores globais e locais, os quais são altamente dependentes da morfologia da superfície da cementita. Do ponto de vista global, a esferoidização seria controlada pela redução da energia livre do sistema, geralmente pela redução das áreas de interface das partículas. Porém, na primeira etapa do processo, o fator predominante para a quebra das lamelas não é a redução da energia de superfície (uma vez que há geração de novas superfícies), mas o equilíbrio de forças entre as interfaces de cementita e de ferrita (efeito local). Isto é decorrente dos defeitos existentes na superfície das lamelas de cementita, as quais possuem grandes irregularidades, como por exemplo, concavidades, subestruturas, falhas de empilhamento, dentre outras (SCHASTLIVTSEV, 1994).

2.4.2.4 Mecanismos do fenômeno de esferoidização

O fenômeno de esferoidização além do ponto de vista da redução da energia livre, também está baseado na difusão de átomos de carbono e ferro na matriz, o que gera um efeito de capilaridade devido às mudanças de concentração de carbono na ferrita (CHADWICK, 1972). Na Figura 13 é apresentada esquematicamente a dependência da esferoidização da cementita com o tamanho médio da partícula no tempo t_0 e, tamanho final, após um tempo t .

Figura 13: Efeito do raio de curvatura de uma partícula sobre a esferoidização.



Fonte: SCHASTLIVTSEV, (1994).

Observa-se que o arredondamento da partícula ocorre pelos raios menores, através de sua dissolução, e precipitação nos raios maiores ($r \sim \infty$).

2.4.2.5 Efeito de alguns elementos de liga na esferoidização

O efeito da inclusão de elementos de liga nos aços a serem esferoidizados, é dependente do ciclo térmico aplicado. Nos ciclos térmicos em que o aço é aquecido em temperaturas superiores a A1, elementos de liga como o cromo e o manganês tendem a acelerarem o processo de esferoidização pois, estabilizam a cementita na austenita formada durante o tratamento térmico realizado em temperaturas mais elevadas, reduzindo a solubilização da cementita na matriz austenítica (OHASHI, 1992). Porém, para ciclos em que o aço é mantido a temperaturas inferiores a A1, o efeito destes elementos pode ser contrário, tendo como principal característica retardar o aparecimento do quarto estágio da esferoidização, ou seja, a grafitização.

Estas partículas de cementita estabilizadas atuarão como núcleos para o coalescimento dos carbonetos esferoidizados. Por outro lado, aços com molibdênio e vanádio formam carbonetos do tipo M_2C e V_4C_3 ou (VC), respectivamente. Estes carbonetos, por apresentarem estruturas cristalinas diferentes daquela de Fe_3C , não atuam como sítios para nucleação da cementita (ATKINSON, 1993; CREE, 1995).

2.4.2.6 Influência do ciclo de recozimento

Coelho (1980) estudou a influência do processo de recozimento em função do tempo e da temperatura no processo de esferoidização do aço, mostrando que estes parâmetros apresentam relativa importância na esferoidização do aço médio carbono. Para tal

experimento, foram realizados recozimentos a temperaturas de 700, 725 e 750°C, variando os tempos de recozimento entre 1h, 4h e 8 horas.

Dentro deste processo, observou-se ainda que a temperatura que apresentou melhores resultados em relação à esferoidização foi a de 700°C, tendo em vista que para esta temperatura não ocorre a austenitização do material. Para a temperatura de 750°C, o autor menciona ainda uma possível austenitização quase completa do material, formando no resfriamento a fase perlítica em morfologia lamelar. O tratamento a temperatura de 725°C ficou caracterizado por uma austenitização parcial, devido à formação, mesmo que em menor volume que o apresentado no tratamento a 750°C, de perlita lamelar.

Ainda para o autor, a influência do tempo ficou notória, ressaltando que o aumento só seria favorável à esferoidização em temperaturas subcríticas, tendo em vista que para temperaturas superiores a A1 o aumento do tempo favoreceria a formação e homogeneização da austenita, propiciando assim a formação de perlita lamelar.

Coutinho (1988) também avaliou a influência do tempo de recozimento na esferoidização de um aço SAE 10100, porém, neste caso, o processo de recozimento de esferoidização foi realizado na temperatura de 715 °C. Ou seja, foi estudada a influência do tempo de recozimento isotérmico subcrítico, nesta temperatura, em tempos progressivos, variando entre 4 horas e 35 horas. Como resultado, observou-se um aumento da fração esferoidizada do aço com o aumento do tempo de recozimento subcrítico, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Evolução da fração esferoidizada em função do tempo de tratamento para o aço SAE 10100;

Amostra	2	3	4	5	6	7	8
Tempo	4 h	8 h	12 h	23 h	27 h	31 h	35 h
Fração Esferoidizada	0%	34,6%	44,2%	41,7%	43,2%	63,0%	91,5%

Fonte: (COUTINHO, 1988).

Coutinho (1990), em outra pesquisa, afirmou que, o grau de esferoidização cresce com a temperatura de recozimento subcrítico, porém, a esferoidização será parcial e não se completa mesmo a temperaturas relativamente elevadas de recozimento subcrítico após elevadas reduções a frio. Tal afirmação está baseada em um estudo do grau de

esferoidização de três aços com diferentes concentrações de carbono, SAE 1015, SAE1045 e SAE1070.

Estes aços foram submetidos a um recozimento pleno, cujo objetivo era obter uma condição de referência. Após o tratamento de recozimento, os aços foram submetidos a reduções de 30%, 40% e 50% em valores nominais, e submetidos a recozimento subcrítico a temperaturas constante de 550, 600 e 650 °C durante o mesmo intervalo de tempo (de 4 a 35 h). Verifica-se um aumento da fração esferoidizada com o aumento da temperatura de recozimento subcrítica conforme verificado na Tabela 5.

Tabela 5: Evolução da fração esferoidizada em função da temperatura para diferentes deformações ocorridas durante um tratamento de 12 horas.

REDUÇÃO	ABNT 1015			ABNT 1045			ABNT 1070		
	550°C	600°C	650°C	550°C	600°C	650°C	550°C	600°C	650°C
30%	38%	36%	46%	38,8%	49,3%	54,7%	12,3%	32,2%	54,8%
40%	49%	58%	63%	46,8%	56,9%	64,8%	33,4%	47,3%	70,2%
50%	51%	59%	71%	53,1%	64,2%	74,1%	51,3%	58,4%	81,0%

Fonte: Coutinho (1990).

A energia acumulada na deformação contribui para a formação da esferoidita durante o tratamento subcrítico. O aumento no teor de carbono também contribui para aumentar a fração de cementita esferoidizada.

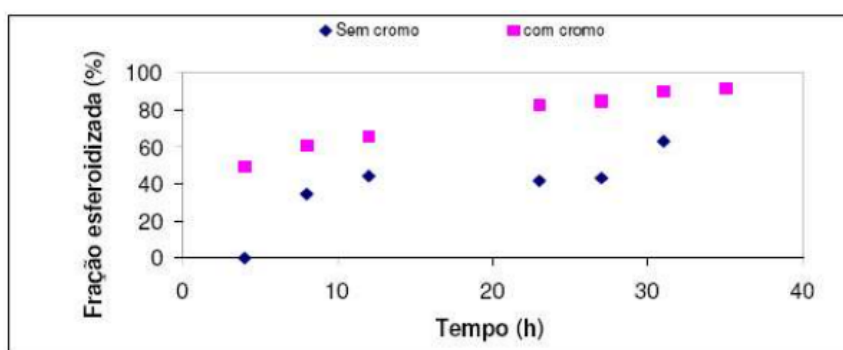
2.4.2.7 Influência da composição química

Além da redução a frio e do ciclo de recozimento, outros fatores influenciam na velocidade de esferoidização. Quanto à composição química, sabe-se por exemplo que, um aço com 0,8% de carbono esferoidiza muito mais rapidamente que um aço com 0,5% de carbono. Deve-se salientar também que tal tipo de comparação só será válida se os dois aços tiverem uma estrutura inicial com o mesmo espaçamento lamelar de perlita. Isto porque se os dois aços forem austenitizados e resfriados nas mesmas condições, têm-se perlita mais fina no de maior teor de carbono, sendo, neste caso, facilitado o processo de esferoidização pelo fato da estrutura inicial ser mais favorável, ocorrendo assim uma influência indireta do teor de carbono. Quanto à influência dos outros elementos de liga,

pode-se usar raciocínio análogo, admitindo que sua influência seja indireta através da influência dos mesmos nas curvas TTT.

Coutinho (1988) apresentou um comparativo entre a fração esferoidizada de um aço carbono e um aço ligado ao cromo, para os mesmos tempos e temperaturas de tratamento de esferoidização. Ficou evidenciada uma evolução mais rápida da fração esferoidizada nas amostras do aço ligado, mostrando a influência do cromo na esferoidização. A Figura 14 mostra um comparativo entre a fração esferoidizada de um aço carbono (SAE 10100) e um aço microligado (SAE 52100).

Figura 14: Influência do cromo na esferoidização do aço carbono.



Fonte: Coutinho (1988).

Além da composição química, a microestrutura inicial tem grande influência na esferoidização. Quanto mais fina a perlita, mais fácil se torna o processo e mais finos serão os carbonetos esferoidizados. Segundo Rocha e Oliveira (2000), que estudaram o efeito da microestrutura prévia no processo de esferoidização, observaram que a aceleração do processo pode ser promovida também pela utilização de estruturas metaestáveis (bainita e/ou martensita), prévias ao tratamento térmico de esferoidização. A aceleração seria promovida pela existência de uma fina dispersão de carbonetos neste tipo de estrutura, servindo de sítios para seu coalescimento. Além desse fator, a presença de alta concentração de discordâncias, características da martensita, facilita a difusão dos átomos de carbono no ferro, aumentando assim a taxa de esferoidização.

Com relação à estrutura perlítica, Rocha e Oliveira (2000), defendem o desenvolvimento de uma estrutura com maximização da ferrita, para o caso dos aços médio carbono, antes do tratamento de esferoidização. Esta opção é justificada pelo fato de que a estrutura com quantidade de ferrita máxima e perlita grosseira, apesar de ser de mais difícil esferoidização, proporciona, após este tratamento, uma estrutura de menor dureza e com carbonetos mais grosseiros em relação a uma estrutura inicial de perlita fina

e menor quantidade de ferrita proeutetóide. Isto proporcionaria uma menor energia para a deformação e um menor consumo de matrizes na fabricação de peças forjadas a frio.

2.5 EFEITOS DA ESFEROIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

As mudanças estruturais sofridas pelo aço durante o tratamento de esferoidização trazem consequências imediatas nas propriedades mecânicas do mesmo. E ainda, a forma como este tratamento é conduzido também pode trazer modificações nas propriedades. Rocha e Oliveira (2000) observaram que o tratamento prévio à esferoidização pode levar a variação nas propriedades do aço SAE 1045 esferoidizados.

Os parâmetros microestruturais são de grande importância na avaliação dos resultados obtidos experimentalmente e explicam de forma concisa a maioria dos fenômenos decorrentes do tratamento de esferoidização. Tais parâmetros podem ser relacionados com propriedades mecânicas, como: resistência do material, limite de escoamento, alongamento, níveis de encruamento entre outras.

As propriedades mecânicas dos materiais definem o comportamento do material (resposta) quando sujeito a cargas externas, sua capacidade de resistir ou transmitir esses esforços sem se fraturar ou deformar de forma incontrolada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para este trabalho são amostras de bobinas de aço laminadas a quente em um laminador para aços especiais. Estas amostras foram cedidas pela Metalúrgica Gerdau S.A.

Foram escolhidos três tipos de aço para este trabalho:

- Aço AISI 5115
- Aço AISI 5140
- Aço AISI 5160

Estes aços têm semelhança nos elementos da composição química, diferindo-se apenas no percentual de carbono, a Tabela 6 discrimina a composição química destes aços.

Tabela 6: Composição química dos aços da família AISI 51XX utilizados no trabalho.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Cr
5115	0,150 - 0,170 %	1,05 - 1,20 %	0,17 - 0,33 %	0,025 % máx.	0,023 - 0,033 %	0,95 - 1,10 %
5140	0,390 - 0,430 %	0,60 - 0,75 %	0,15 - 0,30 %	0,025 % máx.	0,025 % máx.	0,90 - 1,05 %
5160	0,570 - 0,600 %	0,76 - 0,86 %	0,15 - 0,30 %	0,025 % máx.	0,030 % máx.	0,71 - 0,80 %

Fonte: o autor.

Os demais elementos são residuais, têm uma porcentagem baixíssima ao ponto de não influenciarem nas características do aço.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As amostras dos aços da família 51XX utilizadas para os tratamentos térmicos de esferoidização foram obtidas a partir de um tarugo através de lingotamento contínuo, com seção quadrada de 155 mm para laminação em fio máquina, a partir de laminação controlada via Stelmor.

Foram coletadas 9 amostras de cada tipo de aço para que fosse possível realizar a análise de 3 amostras brutas, 3 tratadas no tratamento térmico padrão e 3 que serão

tratadas no novo tratamento térmico proposto, portanto, uma amostra para cada tipo de aço em cada condição de tratamento térmico.

Devido à grande variedade de produtos produzidos pela usina do qual foram coletadas as amostras, há variação no diâmetro de cada tipo de aço, ou seja:

- Para o aço 5115 o diâmetro é de 18 mm;
- Para o aço 5140 o diâmetro é de 18,25 mm;
- Para o aço 5160 o diâmetro é de 13,5 mm.

A diferença de diâmetro entre os diferentes aços não irá interferir nas análises, pois é uma diferença pequena e, como as análises serão feitas entre as amostras dos mesmos aços, a análise comparativa mantém-se válida. Não haverá interferência em relação aos resultados de resistência mecânica, pois estas serão feitas a partir de corpos de prova padrão.

Para desenvolver a análise da influência dos parâmetros de processo na esferoidização deste aço, foi realizada a laminação de 9 tarugos de cada tipo de aço e, após laminação, foi realizado o tratamento térmico de esferoidização em forno contínuo.

Para realização dos ensaios mecânicos e metalografia, foram retiradas amostras antes do tratamento térmico (fio-máquina na condição bruta de laminação), após o tratamento térmico padrão e após o novo tratamento térmico proposto.

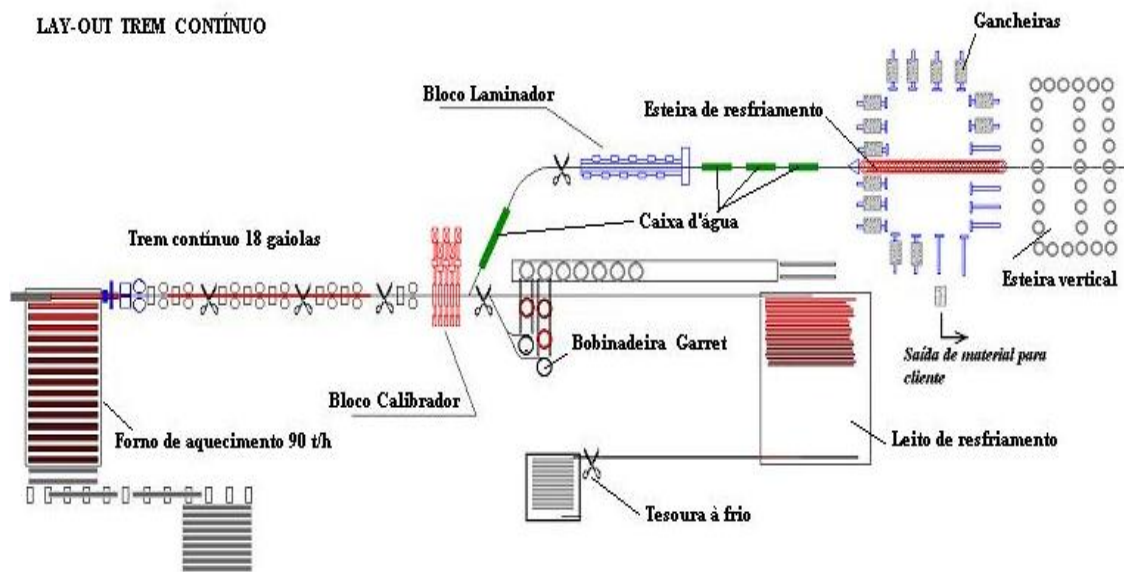
3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento é descrito de acordo com as seguintes etapas: laminação (3.4), tratamento térmico (3.5), planejamento do experimento (3.6), ensaios metalográficos e ensaios mecânicos (3.7), determinação da microestrutura de partida (3.8) e determinação do grau de esferoidização (3.9).

3.4 LAMINAÇÃO

Foi utilizado o laminador de fio máquina da Gerdau Pindamonhangaba que possui a configuração mostrada na Figura 15.

Figura 15: Layout do Laminador de Fio-máquina.



Fonte: Material Gerdau.

Os tarugos são reaquecidos em temperaturas de reaquecimento que possibilitem a conformação a quente no trem contínuo (1100 °C a 1200 °C), com medição da temperatura da superfície do tarugo na saída do forno após a passagem por um descarepador. Este equipamento remove a carepa formada no forno de reaquecimento por um jato d'água de alta pressão.

Através das gaiolas do trem contínuo, o tarugo quadrado com 155 x 155 mm é reduzido através de uma sequência de passes através de 18 gaiolas no trem contínuo. Cada gaiola tem um par de cilindros com canais usinados em uma sequência de passes oval-redondo até a bitola de entrada do Bloco Calibrador. Os pares de cilindros estão montados em sequência de gaiolas intercalando horizontais e verticais.

O princípio de funcionamento do bloco calibrador é diferente do trem contínuo. O bloco calibrador lamina com uma configuração com três cilindros, que possibilitam reduzir a região de alargamento livre com relação à configuração com dois cilindros. Os cilindros são posicionados em configuração "Y" no primeiro passe e "Y invertido", num total de 4 passes. Reduzindo a região de alargamento livre, obtêm-se melhor tolerância dimensional na bitola de entrada do bloco acabador.

Após o bloco calibrador, a barra é laminada no bloco laminador, no qual, são dados os passes de acabamento. No entanto, em função de um sistema de resfriamento por caixas d'água, é possível controlar a temperatura dos passes finais e do início de

resfriamento. O bloco acabador opera com até 10 passes, dependendo da bitola final. A configuração dos discos do bloco acabador é inclinada a 45°/-45°, porém, com o mesmo conceito de sequência oval-redondo. A primeira gaiola a 45°, e o passe seguinte -45°, até a décima gaiola, se houver.

A temperatura nos passes finais e no início de resfriamento é controlada por um sistema de caixas d'água que variam a vazão de água para correção de temperatura dentro de uma faixa especificada. Para que seja feito o controle, estão dispostas 4 caixas d'água, sendo uma antes do bloco laminador e 3 caixas d'água após o bloco laminador e antes do formador de espiras (bobinamento).

As Figuras 16 **a** e **b**, abaixo mostram o formador de espiras e a disposição das espiras na esteira de resfriamento, conhecido como Stelmor. A temperatura é controlada bem no início da esteira e, ainda assim, é possível controlar a taxa de resfriamento das espiras por meio de um controle de velocidade e abertura das espiras sobre a esteira. Além disso, é possível operar com o material abafado (sob tampas com manta refratária), sem nenhuma proteção ou com ventiladores forçando o resfriamento.

Figura 16: Formação de espiras no processo de laminação, (a) formação de espiras; (b) disposição das espiras na esteira.



Fonte: o autor.

3.5 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos são realizados em fornos contínuos de atmosfera controlada para minimizar a decarbonetação. O gás utilizado para controle de atmosfera é o nitrogênio. O equipamento possui 24 zonas de controle individual de temperatura e as cargas de fio máquina são conduzidas por uma mesa de rolos com velocidades pré-

definidas em função da taxa de resfriamento adequada. O esquema da Figura 17 mostra como estas zonas são distribuídas ao longo do percurso do material dentro do forno.

Figura 17: Esquema mostrando as zonas de controle ao longo do trajeto dentro do forno.



Fonte: o autor.

3.5.1 Curvas CCT para aços da família 51XX

Foram levantadas previamente as curvas CCT para os aços da família 51XX estudadas, estas nos apresentam as temperaturas A1 e A3 e, sabendo o tempo de cada ciclo, podemos prever a estrutura microscópica esperada ao fim do tratamento térmico.

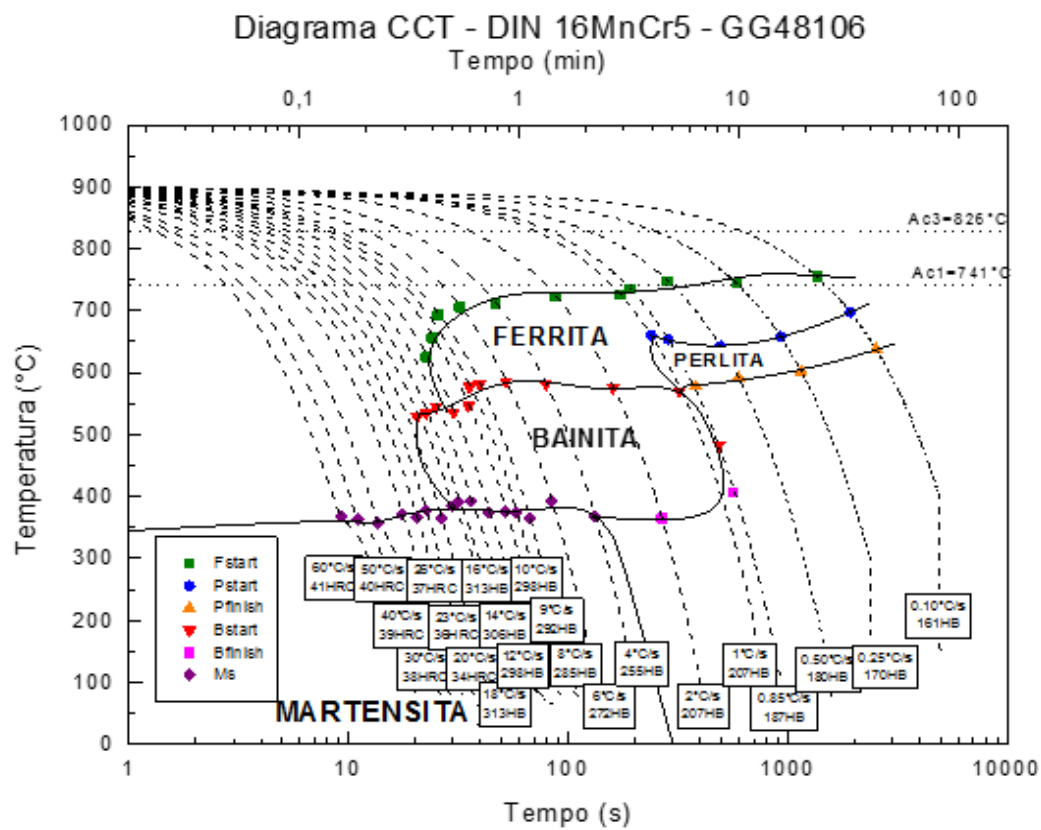
Nestes gráficos, a linha A1 – Indica a ocorrência de uma parada (Arrêt) durante a transformação. No caso do resfriamento em equilíbrio, para um aço com 0,77% C, observa-se uma “parada” na temperatura de 727°C, ou seja, enquanto a transformação $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ não se completar a temperatura permanecerá constante. De forma semelhante, a linha A3 – Indica a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$. À medida que o teor de carbono vai aumentando, a temperatura A3 vai diminuindo, até o limite de 727°C, onde se encontra com A1.

Nos ciclos térmicos em que o aço é aquecido em temperaturas superiores a A1, elementos de liga como o cromo e o manganês tendem a acelerarem o processo de esferoidização, pois estabilizam a cementita na austenita formada durante o tratamento térmico realizado em temperaturas mais elevadas, reduzindo a solubilização da cementita na matriz austenítica (OHASHI, 1992;).

3.5.2 Ciclo de tratamento térmico do Aço 5115

Baseado no diagrama CCT da Figura 18, para o aço 5115, foi idealizado o ciclo padrão ilustrado na Figura 19.

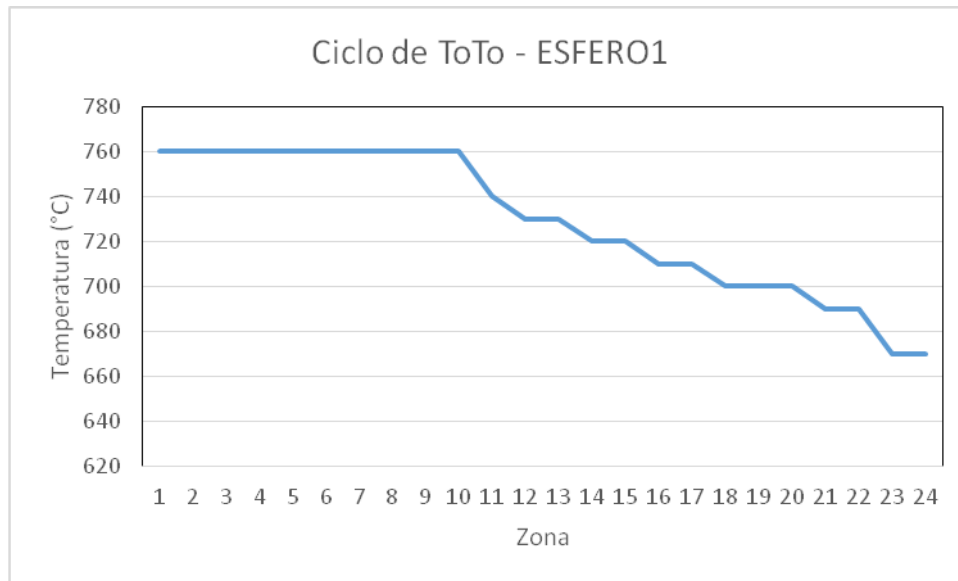
Figura 18: Diagrama CCT para o aço 5115.



Fonte: material Gerdau.

Com isso, pode-se observar que o aço 5115 apresenta um $A_1 = 741^\circ\text{C}$ e $A_3 = 826^\circ\text{C}$. A curva padrão utilizada para o tratamento térmico de esferoidização, aqui denominada de ESFERO1 é mostrada na Figura 19.

Figura 19: Ciclo padrão (ESFERO1) utilizado para esferoidização do aço 5115.



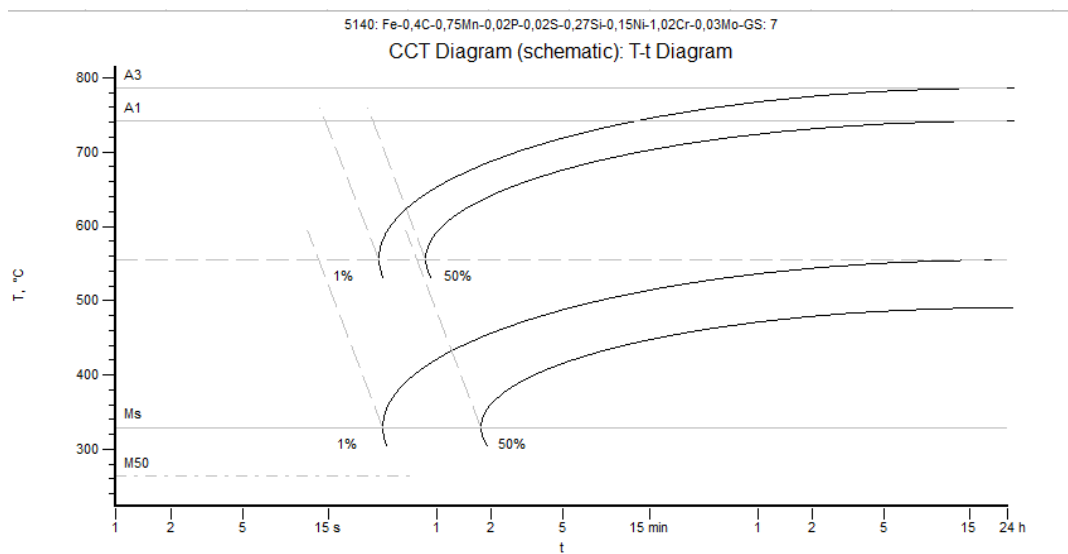
Fonte: o autor.

O ciclo ESFERO1 é realizado com duração de 16:06 horas devido a velocidade padrão pré-determinada para este ciclo.

3.5.3 Ciclo de tratamento térmico do Aço 5140

Foi determinada, para o aço 5140, a curva CCT, conforme ilustrado na Figura 20. A partir deste gráfico foram estipulados os parâmetros padrão para o tratamento de esferoidização do aço 5140, conforme esquematizado na Figura 21.

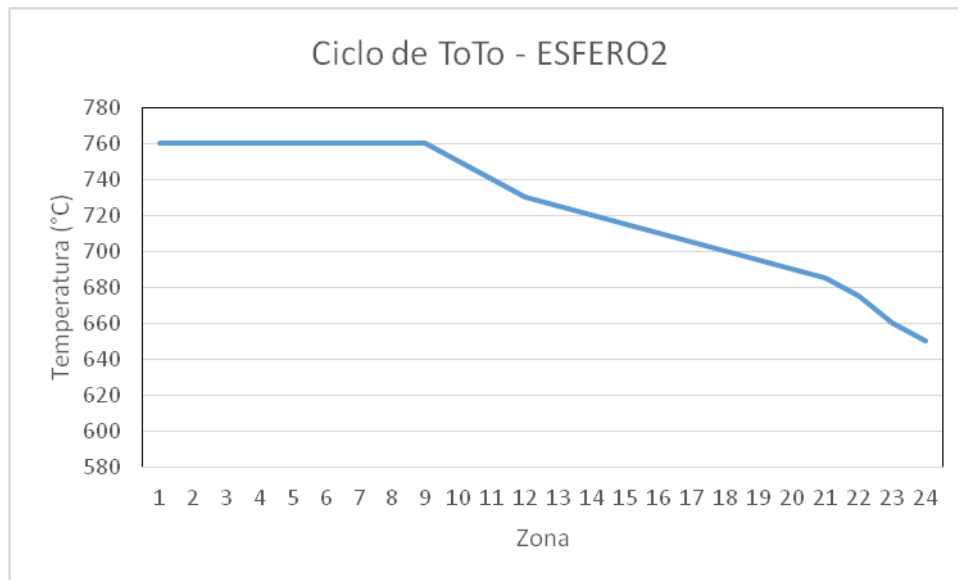
Figura 20: Curva CCT para o Aço 5140.



Fonte: material Gerdau.

Com base na curva CCT, pode-se observar que o aço 5140 apresenta um $A1 = 742^{\circ}\text{C}$ e $A3 = 774^{\circ}\text{C}$. A curva padrão utilizada para o tratamento térmico de esferoidização é a curva ESFERO2, mostrado na Figura 21.

Figura 21: Ciclo padrão (Esfero 2) utilizado para esferoidização do aço 5140.



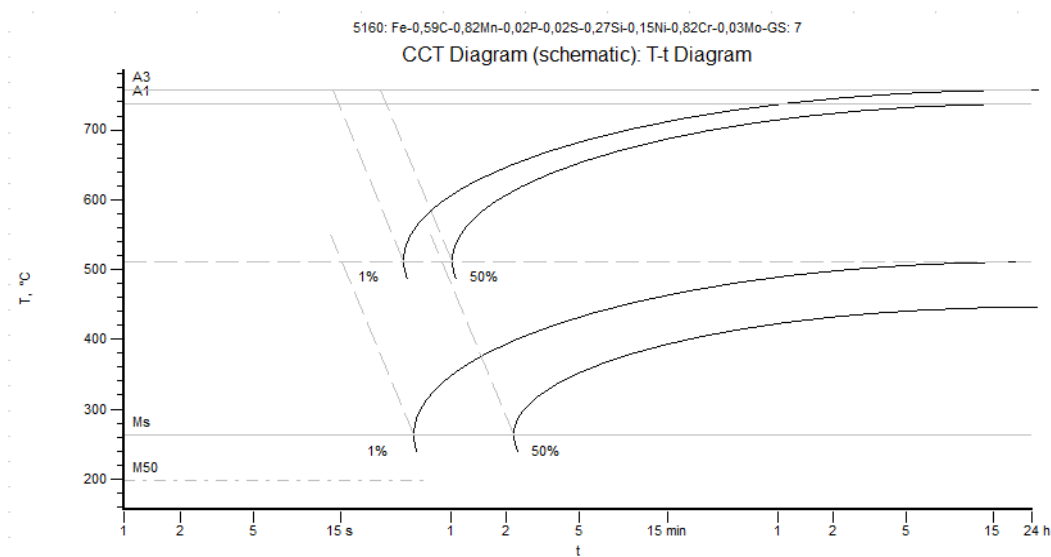
Fonte: O autor

O ciclo ESFERO2 é realizado com duração de 14:54 horas devido a velocidade padrão já estudada para este ciclo.

3.5.4 Ciclo de tratamento térmico do Aço 5160

Foi determinada, para o aço 5160 a curva CCT conforme mostrado na Figura 22.

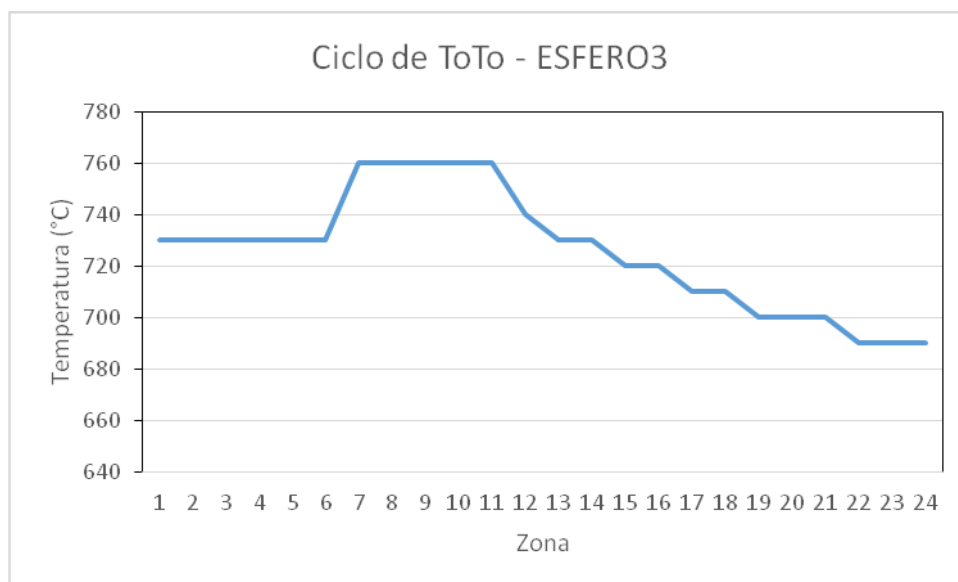
Figura 22: Curva CCT para o aço 5160.



Fonte: material Gerdau.

Desta forma, pode-se observar que o aço 5160 apresenta um A1 = 737°C e A3 = 746°C. A curva padrão utilizada para o tratamento térmico de esferoidização para este aço foi denominada de curva ESFERO3, conforme pode ser vista na Figura 23.

Figura 23: Ciclo padrão (Esfero 3) utilizado para esferoidização o aço 5160.



Fonte: o autor.

O ciclo ESFERO3 é realizado com duração de 17:33 horas devido a velocidade padrão já estudada para este ciclo.

Foram tratadas 3 amostras em cada ciclo. O objetivo do trabalho é testar a possibilidade de tratar toda a família 51XX no ciclo ESFERO2 devido ao seu menor tempo de ciclo. Para isso também foram tratadas 3 amostras do aço 5113 e 3 amostras do aço 5160 no ciclo ESFERO2. Além do ganho em produtividade em um forno que tem um custo de operação igual ao de um laminador também ganhasse com a redução do tempo de troca de ciclos.

3.6 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

As variáveis-resposta consideradas no experimento são:

- Grau de esferoidização (%);
- Dureza (HB);
- Limite de Resistência e Limite de Escoamento (MPa);
- Redução de área e Alongamento (%).

É objetivado que as amostras tratadas no ciclo proposto, ESFERO2, não tenhamos redução fora do padrão da NBR 14677:2001 nas variáveis resposta. A NBR 14677:2001 apresenta um padrão visual para a medição do grau de esferoidização e apresenta a porcentagem aceitável para cada tipo de aço. Dessa forma a NBR 14677:2001 será a forma de avaliar a efetividade ou não dos resultados obtidos neste estudo.

3.6.1 Ensaios mecânicos

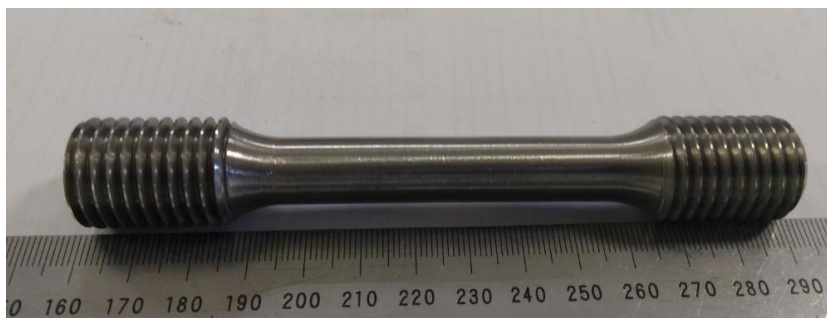
3.6.1.1 Ensaio de dureza

Foram realizados ensaios de dureza Brinell (HB) utilizando o durômetro HECKERT com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf conforme ASTM E10 (2014).

3.6.1.2 Ensaio de Tração

Foram realizados ensaios de tração com as amostras cortadas a partir do fio máquina na máquina de tração KRATOS, sem realização de usinagem, conforme NBR 6152 (1992). Na figura 24 observa-se o corpo de prova padrão ASTM utilizado nos ensaios de tração.

Figura 24: Corpo de prova padrão ASTM para ensaios de tração.



Fonte: o autor.

3.7. PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

As amostradas foram coletadas após laminação e após os tratamentos térmicos, estas foram destinadas para preparação que inclui, basicamente:

- a) Corte das amostras em serra de fita para metalografia e dureza (HB);
- b) Embutimento das amostras em resina fenólica;
- c) Lixamento das amostras embutidas com lixas d'água com granulometria #100, #220, #320 e #600;
- d) Polimento das amostras embutidas com alumina de 6 μ m e 1 μ m;
- e) Ataque químico com Nital 2%;
- f) Análise metalográfica e de grau de esferoidização utilizando um microscópio LEICA DMLM equipado com câmera LEICA DFC 295 e software LEICA QWINV3 para análise de imagens.

3.7.1 Determinação da microestrutura de partida

Para caracterização da microestrutura de partida foram analisadas visualmente, com auxílio do microscópio óptico, as porcentagens de cada constituinte (ferrita, perlita, bainita e martensita) em cada amostra. Foi considerada para efeito de ensaio e registro a região com menor quantidade de constituintes aciculares (bainita e martensita), pois essa região apresentaria, teoricamente, a de menor tendência à esferoidização. Foram feitas fotomicrografias com aumento de 500X de todas as condições ensaiadas. Para efeito de análise foram feitas fotomicrografias de algumas amostras com aumento de 1000X.

3.7.2 Determinação do Grau de Esferoidização

Para determinação do grau de esferoidização foi realizada uma comparação das micrografias com ampliação de 500X, para cada condição do experimento, conforme indicado pela Norma NBR 14677 (2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ciclos de tratamentos térmicos de esferoidização propostos no capítulo 3, foram criados e otimizados para atender a maior quantidade possível de aços levando em consideração a estrutura que se quer obter, as propriedades mecânicas exigidas e as temperaturas de A1 e A3 para cada aço.

Nas curvas ESFERO1 e ESFERO2 é realizado o Resfriamento Controlado: o material é aquecido até uma temperatura 10 a 30°C acima de A1, permanecendo nesta temperatura por determinado tempo, sendo, posteriormente, resfriado lentamente. Este ciclo visa propiciar uma dissolução incompleta da cementita em temperaturas de 10 a 30°C acima de A1. Durante o resfriamento, as partículas de cementita não dissolvidas atuam como núcleo para o crescimento dos carbonetos esferoidizados. Devido ao pequeno intervalo das linhas A1 e A3 do aço 5160 no momento em que o material atinge 760°C ocorre início da austenitização total do material, o que é um ponto de atenção para este estudo quando este aço for ser tratado no ciclo proposto.

Já na curva ESFERO3 o ciclo começa com o Recozimento Subcrítico: neste tratamento o aço é aquecido à temperatura um pouco abaixo de A1, permanecendo nesta temperatura por um longo período de tempo. Depois, aquece-se o material até atingir a temperatura de 760°C, permanece-se nesta temperatura por um determinado tempo e, então, é iniciado o resfriamento controlado.

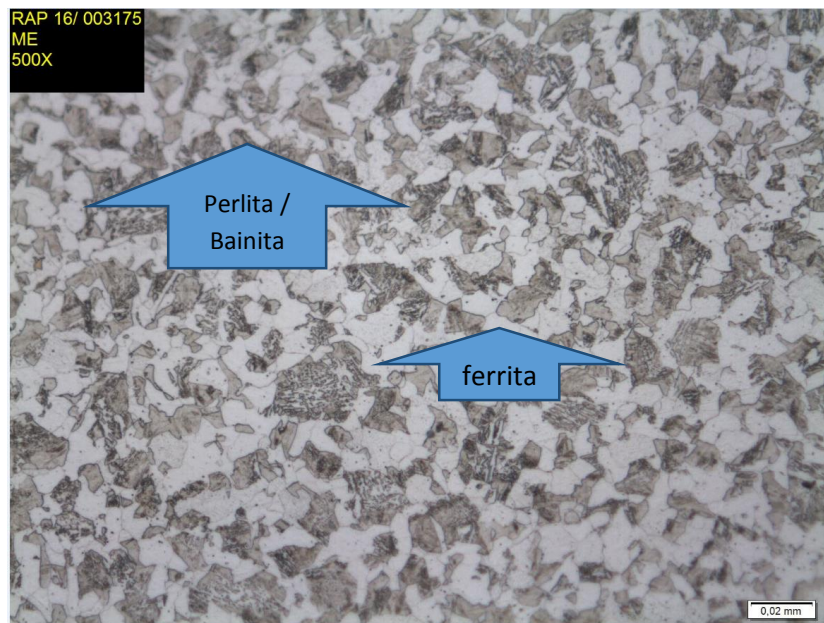
4.1 – MICROGRAFIAS DOS AÇOS 5115, 5140 E 5160, CONFORME RECEBIDOS, TRATADOS TERMICAMENTE NO CICLO PADRÃO E NO NOVO CICLO PROPOSTO

4.1.1 Micrografias do aço 5115

4.1.1.1 Micrografia do aço 5115 – como recebido

A micrografia da Figura 25 apresenta a estrutura do aço 5115 como recebido, após a laminação a quente. Pode-se separar visualmente as fases existentes: ferrita (fase clara), bainita e perlita (regiões escuras). As fases existentes são devido a baixa porcentagem ~~9%~~ de C existente neste aço.

Figura 25: Micrografia do aço 5115 como recebido com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.1.1.2 Micrografia do aço 5115 – tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO1

A microestrutura da Figura 26 é formada basicamente por ferrita (fase clara) e cementita esferoidal (pontos escuros) que se formaram após o tratamento térmico de esferoidização no ciclo padrão, ESFERO1. O tempo prolongado de permanência em temperaturas próximas da transformação de fase, inicialmente a 760 °C, pouco acima de A1, irá nuclear a fase austenita em parte da microestrutura, este processo concentra inicialmente o carbono nesta fase austenítica formada e, posteriormente, a permanência em temperaturas um pouco abaixo de A1, favorecem a difusão do carbono e a formação de carbonetos concentrados em pequenas regiões, em formato de esferas. O baixo teor de carbono contribui para a formação de grandes áreas livres de carbonetos, constituídos basicamente de ferrita.

Figura 26: Micrografia do aço 5115 tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO1, com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.1.1.3 Micrografia do aço 5115 – tratado termicamente no novo ciclo proposto, ESFERO2

A microestrutura da Figura 27 é formada basicamente por ferrita e cementita esferoidal que se formaram após o tratamento térmico de esferoidização no novo ciclo proposto, ESFERO2.

Nota-se que a micrografia obtida é semelhante à obtida pelo processo ESFERO1, para este mesmo aço, obteve-se uma matriz ferrítica, com pontos de carbonetos esferoidizados. Neste ciclo, há uma redução no tempo de tratamento térmico de cerca de 2 horas, se comparado com o ciclo padrão.

Figura 27: Micrografia do aço 5115 tratado termicamente no ciclo proposto, ESFERO2, com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.1.2 Micrografias do aço 5140

4.1.2.1 Micrografia do aço 5140 – como recebido

A micrografia da Figura 28 apresenta a estrutura do aço 5140 como recebido, após a laminação a quente. A microestrutura é constituída basicamente por martensita e bainita. Devido ao rápido resfriamento após a laminação, ocorre em maior proporção a formação de fases duras, martensita e bainita, e em menor proporção aparecem na estrutura pequenas regiões claras, com prováveis formação de ferrita ou austenita retida. Para melhor definição destas fases seriam necessários novos ataques que diferenciassem a ferrita da austenita, como por exemplo, a solução aquosa de metabissulfito de sódio poderia revelar a austenita e o ataque de LePera poderia revelar a bainita (AVISHAN et al., 2013; SAKUMA et al., 1991, DRUMOND et al., 2014).

Figura 28: Micrografia do aço 5140 bruto com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.1.2.2 Micrografia do aço 5140 – no ciclo padrão, ESFERO2

A microestrutura da Figura 29 é formada basicamente por ferrita (fase clara) e cementita esferoidal que se formaram após o tratamento térmico de esferoidização no ciclo padrão, ESFERO2.

Nota-se uma transformação substancial na estrutura, as regiões brancas, formadas durante o tratamento a 760°C (ferrita pro-eutetoide) e as formadas devido as transformações um pouco abaixo de A1, quando ocorre a difusão de carbono, formando carbonetos esferoidizados na estrutura, percebe-se uma concentração maior nos contornos de grão e nas suas proximidades.

Figura 29: Micrografia do aço 5140 tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO2, que coincide com o novo ciclo proposto, com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.1.3 Micrografias do aço 5160

4.1.3.1 Micrografia do aço 5160 – como recebido

A micrografia da Figura 30 apresenta a estrutura do aço 5160 como recebido, após a laminação a quente. Podem-se separar visualmente as fases existentes. O resfriamento rápido após a laminação propiciou o aumento do percentual de martensita, mas há a presença de perlita também. Embora em menor proporção, há a presença de fases claras, ferrita e/ou austenita retida.

Figura 30: Micrografia do aço 5160 como recebido, com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.1.3.2 Micrografia do aço 5160 – tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO3

A microestrutura da Figura 31 é formada basicamente por ferrita e cementita esferoidal que se formaram após o tratamento térmico de esferoidização no ciclo padrão, ESFERO3.

O tratamento mostrou-se eficaz, proporcionando a difusão do carbono, e a formação de esferoidita. Nota-se, em alguns pontos (poucos) a formação de lamelas de cementita, indicando que a perlita deste local não foi totalmente modificada.

Figura 31: Micrografia do aço 5160 tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO3, com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.1.3.3 Micrografia do aço 5160 – tratado termicamente no ciclo proposto, ESFERO2

A microestrutura da Figura 32 é formada basicamente por ferrita e cementita esferoidal que se formaram após o tratamento térmico de esferoidização no ciclo proposto, ESFERO2.

Embora estejam presentes na microestrutura regiões brancas, formadas pela fase ferrita, e concentrações mais densas no tom escuro, correspondente a cementita, nota-se que há a presença de carbonetos alongados em maior intensidade que no ciclo do ESFERO3, dando indícios de que a esferoidização foi apenas parcialmente atingida.

Figura 32: Micrografia do aço 5160 tratado termicamente no ciclo proposto, ESFERO2, com aumento de 500x. Ataque nital.



Fonte: o autor.

4.2 ENSAIO DE DUREZA (HB)

No gráfico da Figura 33 abaixo serão apresentados os resultados coletados dos ensaios de dureza das amostras. Os Ensaios de dureza Brinell (HB) foram realizados utilizando o durômetro HECKERT com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf, conforme ASTM E10 (2014). Como esperado, os tratamentos térmicos de esferoidização reduzem a dureza dos aços, facilitando a sua maleabilidade e usinabilidade.

Conforme o gráfico da Figura 33, nota-se que pelo tratamento térmico das amostras do aço AISI 5115 no ciclo padrão, ESFERO1, reduziu-se em média 37% a dureza do material e no ciclo proposto, ESFERO2, a redução foi de 31%. A distribuição mais heterogênea dos carbonetos também explica valores ligeiramente mais elevados de dureza no ciclo proposto. Dessa forma, o resultado de dureza para o aço 5115 no ciclo proposto, ESFERO2, não diverge muito do resultado obtido no ciclo padrão e, dessa forma, o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

O tratamento térmico das amostras do aço AISI 5130 no ciclo padrão que também é o proposto para os outros dois tipos de aço, ESFERO2, reduziu em média 44% da dureza do material, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 33. Neste caso o tratamento

proposto coincide com o padrão, de forma análoga, a dureza é semelhante nos dois tratamentos realizados.

O tratamento térmico das amostras do aço AISI 5160 tratadas no ciclo padrão, ESFERO3, reduziu em média 38,8% da dureza do material e no ciclo proposto, ESFERO2, a redução foi de 37,4%. Dessa forma o resultado de dureza para o aço 5160 no ciclo proposto, ESFERO2, não diverge muito ao resultado obtido no ciclo padrão. A distribuição mais heterogênea dos carbonetos também explica valores um pouco mais elevados de dureza no ciclo proposto. O que ocorre é um aumento no desvio padrão do material no ciclo proposto, porém, a variação da media não é significativa e, dessa forma, o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

Nota-se que, para todos os aços estudados, há uma grande redução no valor de dureza ao ser aplicado o ciclo térmico de esferoidização. O aumento do teor de carbono do aço também aumenta os valores de dureza. Comparando o ciclo padrão utilizado na esferoidização e o novo ciclo proposto, não se observa diferenças acentuadas nos valores de dureza.

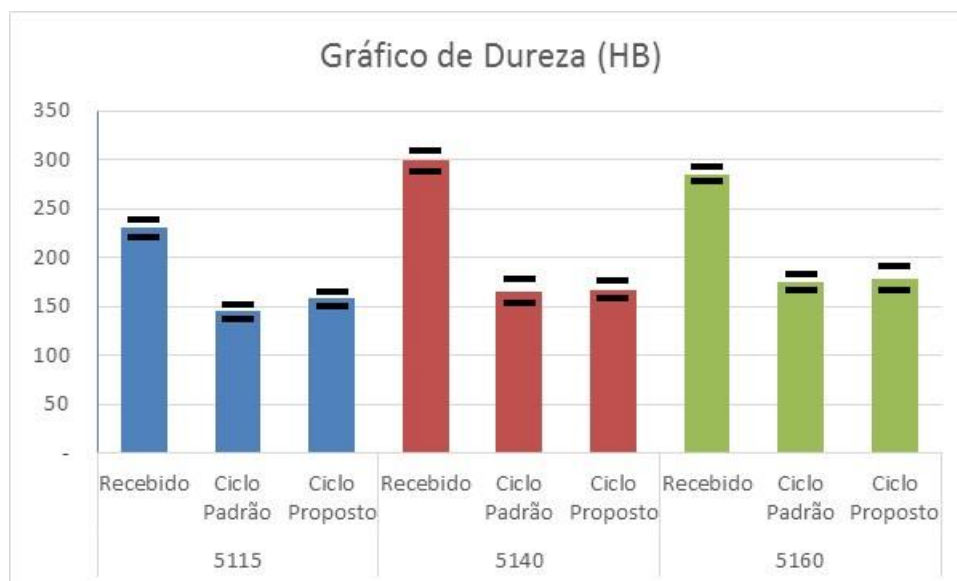
A partir da análise do gráfico da Figura 33, pode-se concluir que o resultado de dureza esperado para o tratamento de esferoidização é atingido tanto pelo ciclo padrão como pelo novo ciclo proposto.

Tabela 7: Dados de dureza Brinell (HB) para as amostras dos aços 5115, 5140 e 5160 no estado como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão e no ciclo proposto.

	5115			5140			5160		
	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto
Valor 1	229,00	143,00	156,00	298,00	164,00	164,00	285,00	174,00	177,00
Valor 2	239,00	153,00	166,00	309,00	179,00	177,00	293,00	183,00	192,00
Valor 3	222,00	138,00	152,00	289,00	154,00	161,00	278,00	167,00	167,00
Média	230,00	144,67	158,00	298,67	165,67	167,33	285,33	174,67	178,67
Desvio Padrão	8,54	7,64	7,21	10,02	12,58	8,50	7,51	8,02	12,58

Fonte: o autor.

Figura 33: Representação dos intervalos de dureza (HB) para os aços AISI 5115, 5140 e 5160 nas condições: como recebido, tratados termicamente no ciclo padrão e tratados termicamente no novo ciclo proposto – ESFERO2.



Fonte: o autor.

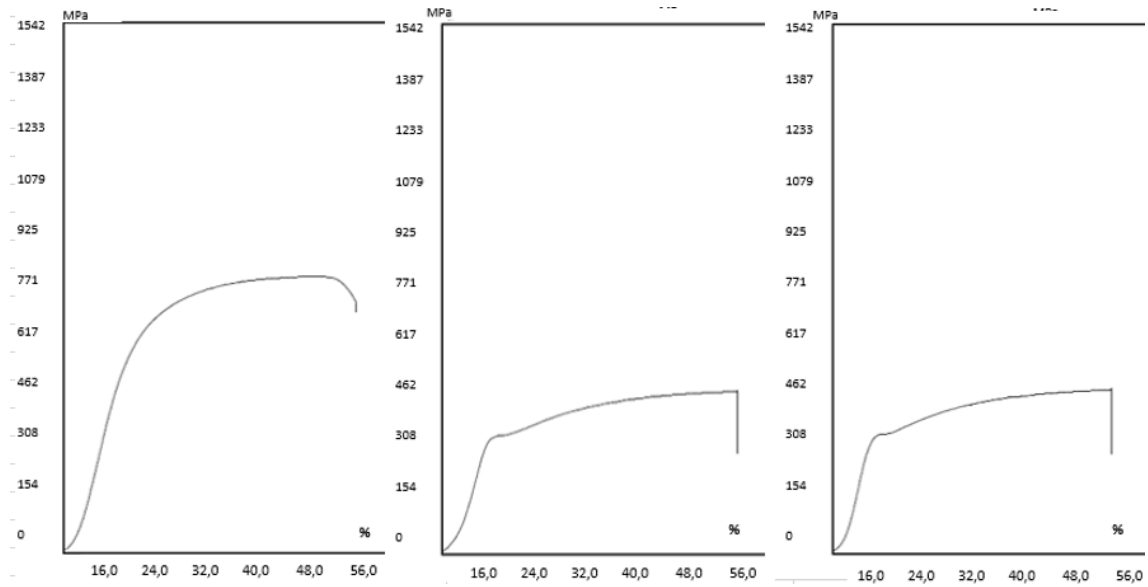
4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados de limite de resistência, de escoamento, alongamento e estricção foram obtidos a partir do ensaio de tração com as amostras cortadas a partir do fio máquina, sem realização de usinagem, conforme NBR 6152 (1992). São mostrados nos gráficos das Figura 34, 35 e 36, curvas típicas para os ensaios de tração realizados para o aço AISI 5115, nas três condições estudadas.

4.3.1 Comparação entre os gráficos de tração para os aços 5115, 5140 e 5160.

Na Figura 34 observa-se a comparação dos gráficos de tração do aço 5115 na condição como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO1, e no ciclo proposto, ESFERO2. Pode-se perceber com uma análise visual que o limite de resistência mecânica diminui após o aço 5115 ser tratado termicamente e o seu alongamento aumenta, como esperado.

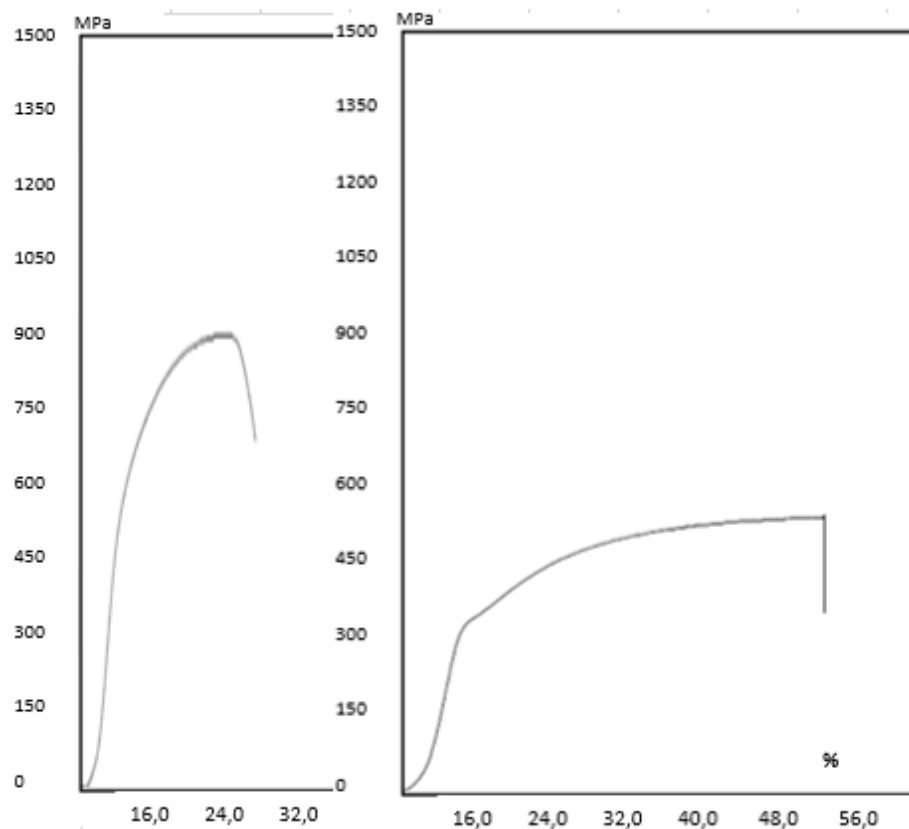
Figura 34: Apresenta as curvas de tração do aço 5115 para as condições: como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão e no ciclo proposto.



Fonte: o autor.

Na Figura 35 observa-se a comparação dos gráficos de tração do aço 5140 na condição como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão, que também é o ciclo proposto, ESFERO2. Pode-se perceber que o limite de resistência mecânica diminui após o aço 5140 ser tratado termicamente e que o seu alongamento aumenta, como esperado.

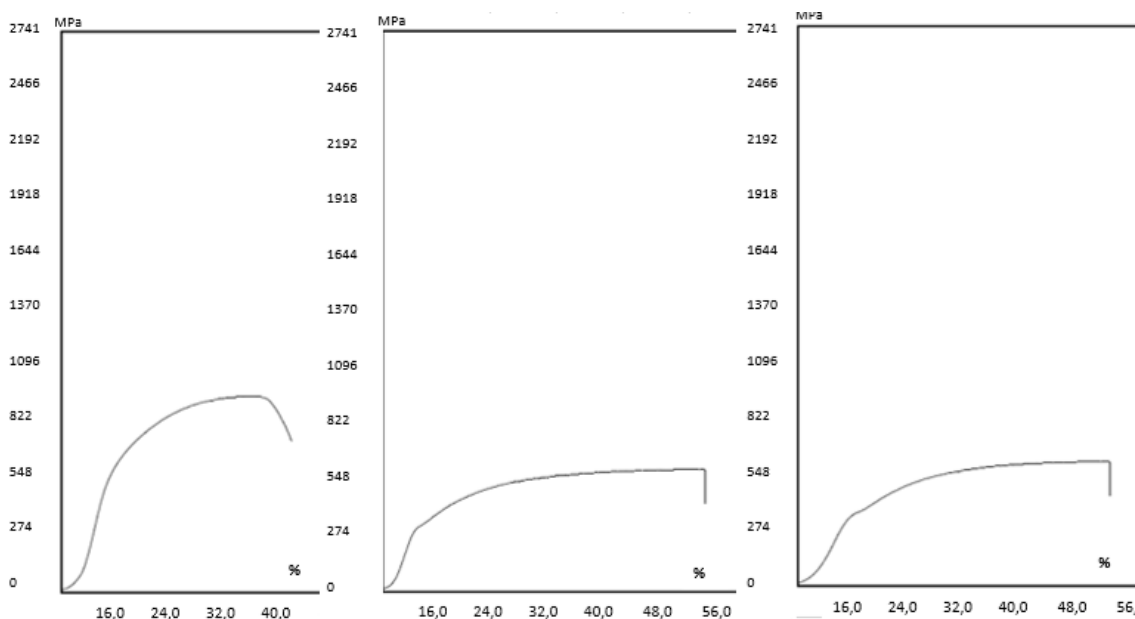
Figura 35: Apresenta as curvas de tração do aço 5140, para as condições: como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão, que é o mesmo ciclo do proposto.



Fonte: o autor.

Na Figura 36 observa-se a comparação dos gráficos de tração do aço 5160 na condição como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão, ESFERO3, e no ciclo proposto, ESFERO2. Pode-se perceber que o limite de resistência mecânica diminui após o aço 5160 ser tratado termicamente e que o seu alongamento aumenta, como esperado.

Figura 36: Apresenta as curvas de tração do aço 5160 para as condições: como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão e no ciclo proposto.



Fonte: o autor.

4.3.2 - Resistência Mecânica (MPa)

Conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 37, o tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO1, reduziu em média 42% o nível do limite de resistência mecânica do material e no ciclo proposto, ESFERO2, a redução foi de 40,9%. Dessa forma a diferença na média do limite de resistência mecânica para o aço 5115 no ciclo padrão ESFERO1 e no ciclo proposto ESFERO2 é pouco significativo. Dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

O tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO2, que também é o ciclo proposto, reduziu em média 47,2% o nível do limite de resistência mecânica do material, conforme pode ser visto na Figura 37.

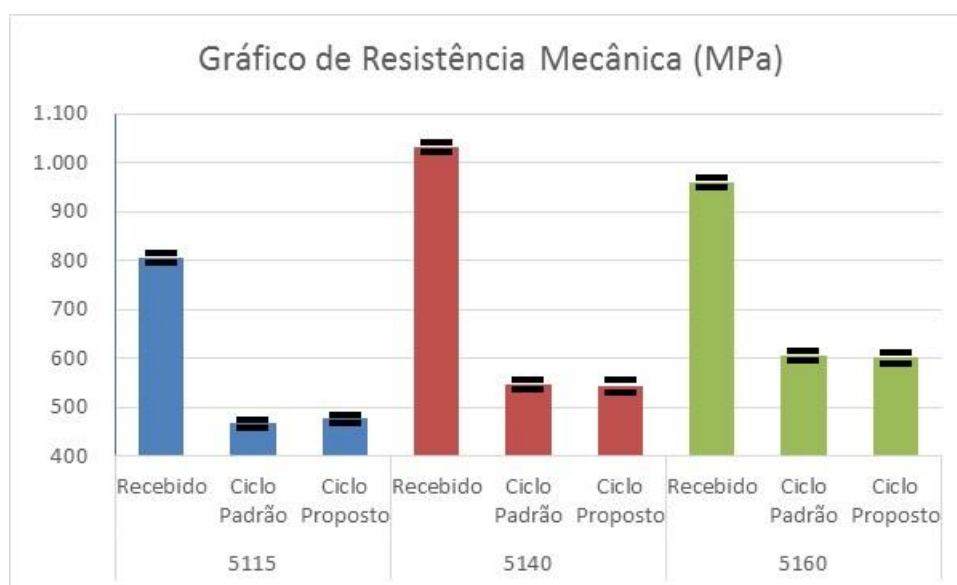
O tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO3, reduziu em média 36,9% o nível do limite de resistência mecânica do material e no ciclo proposto, ESFERO2, a redução foi de 37,4%. Dessa forma a diferença na média da resistência mecânica para o aço 5160 no ciclo padrão ESFERO3 e no ciclo proposto ESFERO2 praticamente não existe, havendo indício de redução na resistência devido ao tratamento no novo ciclo proposto. Dessa forma, o resultado relativo à avaliação do limite de resistência é positivo para a validação do ciclo proposto.

Tabela 8: Dados de resistência mecânica (MPa) para as amostras dos aços 5115, 5140 e 5160 no estado como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão e no ciclo proposto.

	5115			5140			5160		
	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto
Valor 1	804,00	466,00	474,00	1.031,00	543,00	543,00	957,00	604,00	599,00
Valor 2	816,00	476,00	484,00	1.042,00	556,00	556,00	969,00	615,00	614,00
Valor 3	797,00	459,00	470,00	1.024,00	539,00	531,00	952,00	597,00	589,00
Média	805,67	467,00	476,00	1.032,33	546,00	543,33	959,33	605,33	600,67
Desvio Padrão	9,61	8,54	7,21	9,07	8,89	12,50	8,74	9,07	12,58

Fonte: o autor.

Figura 37: Representação dos intervalos de resistência mecânica (Limite de Resistência) para o aço 5115, 5140 e 5160 como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão – ESFERO1 e tratado termicamente no ciclo proposto – ESFERO2.



Fonte: o autor.

4.3.3 Estricção

Em comparação com o aço como recebido, para o aço AISI 5115, o tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO1, aumentou em média 300% a porcentagem de estricção do material e, no novo ciclo proposto, ESFERO2, o aumento foi de 302% (Figura 38). Dessa forma, praticamente não se observou diferença na média da estricção para o aço 5115 no ciclo padrão ESFERO1 e no ciclo proposto ESFERO2. Vale salientar que, o novo ciclo proposto apresentou um desvio da média menor do que o resultado do ciclo padrão, ou seja, o resultado foi melhor. Dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto também na análise relativa a estricção.

Esta mesma comparação, para o aço 5140 mostrou que o tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO2, que também é o ciclo proposto, aumentou em média

259,4% da porcentagem de estrição do material. Estes resultados podem ser vistos na Figura 38.

Para o aço AISI 5160, o tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO3, aumentou em média 222,7 % na estrição do material e no ciclo proposto, ESFERO2, o aumento foi de 221,3% (Figura 38). Dessa forma, a diferença na média da estrição para o aço 5160 no ciclo padrão ESFERO3 e no ciclo proposto ESFERO2 é insignificante.

Vale salientar que o resultado para o ciclo proposto apresentou um desvio da média maior do que o resultado do ciclo padrão, ou seja, é um ponto de atenção a ser analisado mais à frente. Dessa forma, as análises relativas a estrição indica também um resultado positivo para a validação do ciclo proposto.

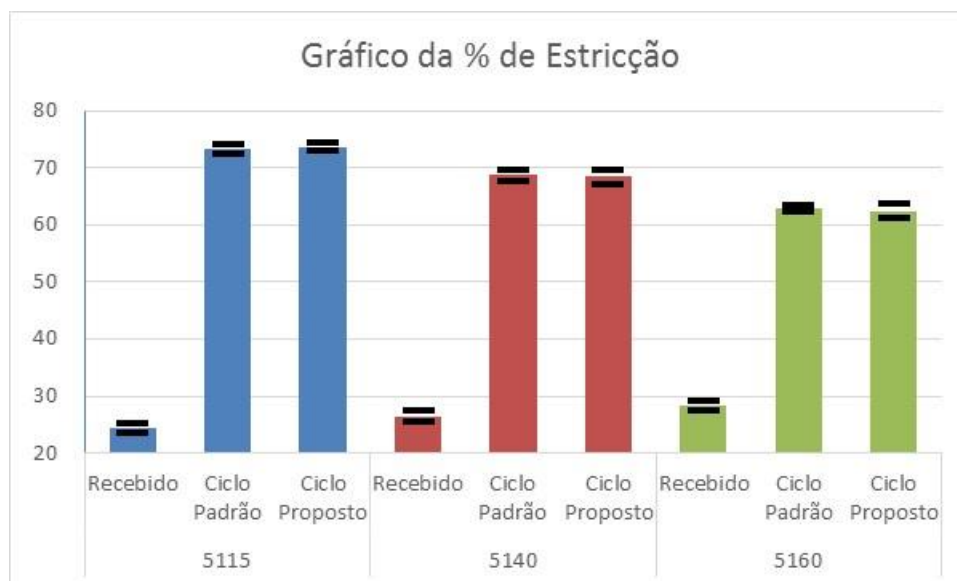
Para todos os casos, a redução de área encontrada para o novo ciclo proposto é tão eficaz quanto ao tradicional, indicando que, para esta propriedade, mantêm-se os valores desejáveis.

Tabela 9: Dados de estrição (%) para as amostras dos aços 5115, 5140 e 5160 no estado como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão e no ciclo proposto.

	5115			5140			5160		
	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto
Valor 1	24,20	73,20	73,40	26,30	68,40	68,40	28,00	62,10	62,30
Valor 2	25,40	74,20	74,40	27,40	69,70	69,70	29,20	63,20	63,80
Valor 3	23,50	72,40	73,26	25,60	68,00	67,20	27,50	63,30	61,30
Média	24,37	73,27	73,69	26,43	68,70	68,43	28,23	62,87	62,47
Desvio Padrão	0,96	0,90	0,62	0,91	0,89	1,25	0,87	0,67	1,26

Fonte: o autor.

Figura 38: Representação dos intervalos da % de estricção para o aço 5115, 5140 e 5160, como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão – ESFERO1 e tratado termicamente no ciclo proposto – ESFERO2.



Fonte: o autor.

4.3.4 Alongamento

O gráfico da Figura 39 ilustra os valores médios e respectivos desvios padrões para o alongamento dos corpos de prova do aço 5115. O tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO1, aumentou em média apenas 4,7% do alongamento do material, se comparado com o aço como recebido. No ciclo proposto, ESFERO2, o aumento foi de 2,3%. Dessa forma a diferença na média do alongamento para o aço 5115 no ciclo padrão ESFERO1 e no ciclo proposto ESFERO2 é insignificante. Vale salientar que o resultado para o ciclo proposto apresentou um desvio padrão menor, porém, uma média um pouco menor do que o resultado do ciclo padrão. Dessa forma, o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

Os valores médios e desvios padrões do alongamento, obtidos após os ensaios dos corpos de prova do aço 5140, podem ser vistos no gráfico da Figura 39. O tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO2, que também é o ciclo proposto, aumentou em média 52,9% o alongamento do material.

Ao se comparar com os valores de alongamento do aço 5115, nota-se que o aumento percentual foi maior, no entanto os valores absolutos são semelhantes, ambos têm um alongamento um pouco superior a 45%, após o tratamento de esferoidização.

Este ganho de ductilidade do aço 5140, entre o material antes do tratamento de esferoidização e após o tratamento, ocorre devido ao teor de carbono mais elevado. No caso do aço 5115, com menor teor de carbono, o percentual de ferrita já é mais elevado, garantindo uma melhor ductilidade mesmo no aço que não recebeu o tratamento de esferoidização.

O gráfico da Figura 39 mostra, de forma comparativa, os resultados obtidos para o alongamento do aço 5160. O tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO3, aumentou em média 42,9% o alongamento do material e, no ciclo proposto, no ciclo de tratamento ESFERO2, o aumento foi de 38,3%. Notou-se também que o ciclo proposto, ESFERO2, apresentou um desvio da média maior do que o encontrado no ciclo padrão, a média foi um pouco menor que a encontrada no ciclo padrão. Isso se torna um ponto de atenção, semelhante ao que foi observado para a redução de área.

Também neste caso, devido ao teor de carbono mais elevado, nota-se um aumento significativo no alongamento após ambos os tratamentos de esferoidização aplicados.

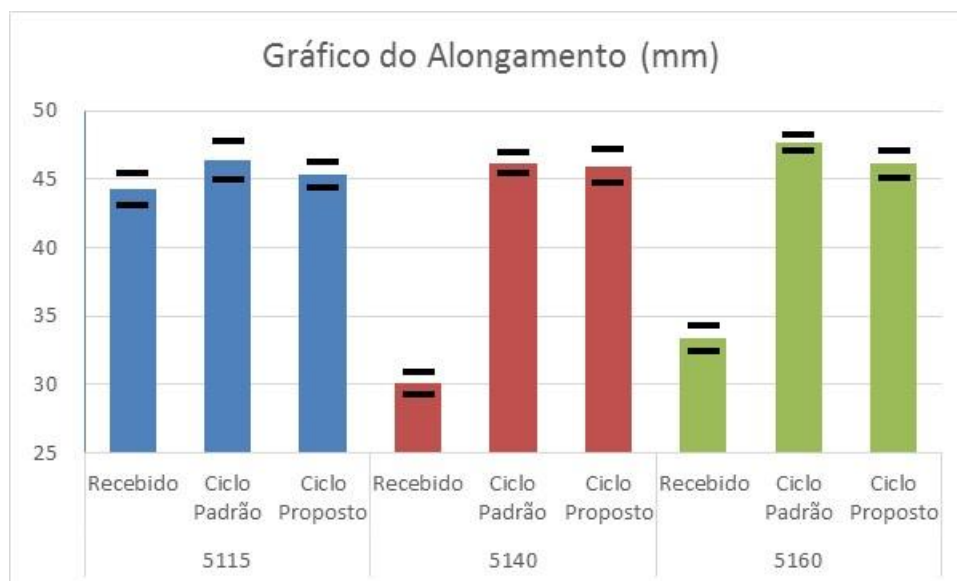
Após os tratamentos de esferoidização o ganho de ductilidade medida pelo alongamento foi notório, principalmente para os aços 5140 e 5160, com teor de carbono mais elevados.

Tabela 10: Dados de alongamento (mm) para as amostras dos aços 5115, 5140 e 5160 no estado como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão e no ciclo proposto.

	5115			5140			5160		
	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto
Valor 1	44,00	46,00	45,00	30,00	46,00	46,00	33,00	47,00	46,00
Valor 2	45,60	48,00	46,34	31,00	47,10	47,15	34,40	48,00	47,21
Valor 3	43,28	45,17	44,56	29,42	45,54	44,73	32,66	48,00	45,20
Média	44,29	46,39	45,30	30,14	46,21	45,96	33,35	47,67	46,14
Desvio Padrão	1,19	1,45	0,93	0,80	0,80	1,21	0,92	0,58	1,01

Fonte: o autor.

Figura 39: Representação dos intervalos do alongamento para o aço 5115, 5140 e 5160, como recebido, sem tratamento de esferoidização, tratado termicamente no ciclo padrão – ESFERO1 e tratado termicamente no ciclo proposto – ESFERO2.



Fonte: o autor.

4.4.4 Limite de escoamento

Conforme observado no gráfico da Figura 40 o tratamento térmico das amostras do aço AISI 5115 no ciclo padrão, ESFERO1, reduziu 51,6% do limite de escoamento do material e no ciclo proposto, ESFERO2, a redução foi de 52,6%. Dessa forma a diferença na média do alongamento para o aço 5115 no ciclo padrão ESFERO1 e no ciclo proposto ESFERO2 é insignificante. Vale salientar que, o resultado para o ciclo proposto apresentou um desvio padrão maior, porém, uma média um pouco maior do que o resultado do ciclo padrão, mas não irá interferir nos resultados. Dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

O gráfico da Figura 40 mostra os resultados para o limite de escoamento encontrado para o aço 5140. O tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO2, que também é o ciclo proposto, reduziu em média 46,4% do limite de escoamento do material.

O gráfico da Figura 40 mostra os valores do limite de escoamento encontrados para o aço 5160 antes e após os tratamentos propostos. O tratamento térmico das amostras no ciclo padrão, ESFERO3, reduziu em média 52,7% o valor do limite de escoamento do material e no ciclo proposto, ESFERO2, a redução foi de 27%. Dessa forma o ciclo proposto ESFERO2 apresentou uma média próxima ao do material como recebido o que

se torna um ponto de atenção, pois a média se distanciou muito da média do material tratado no ciclo padrão.

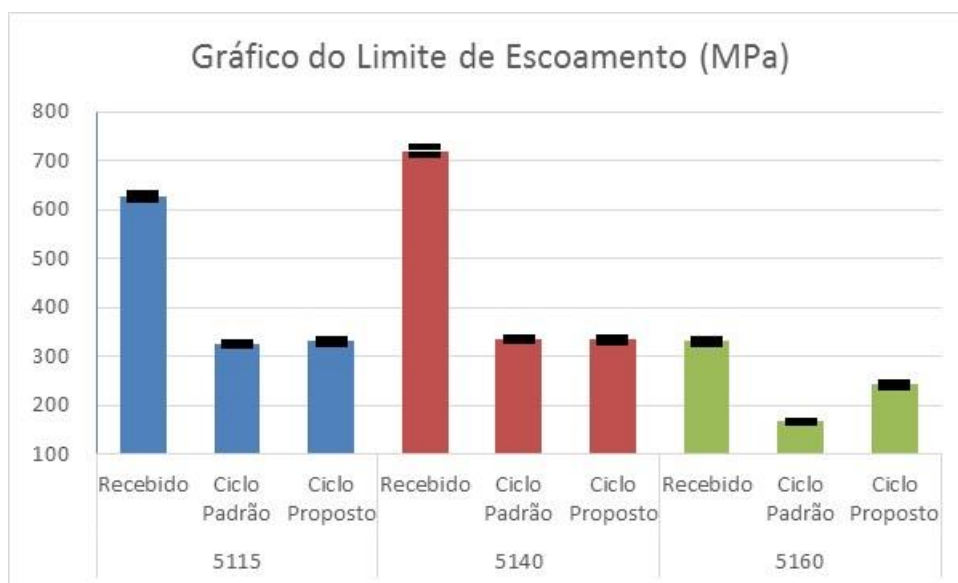
Com exceção do limite de escoamento obtido no ciclo proposto para o aço 5160, os outros valores de escoamento obtidos no novo ciclo proposto foram compatíveis com o ciclo padrão.

Tabela 11: Dados de limite de escoamento (MPa) para as amostras dos aços 5115, 5140 e 5160 no estado como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão e no ciclo proposto.

	5115			5140			5160		
	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto	Recebido	Ciclo Padrão	Ciclo Proposto
Valor 1	633,64	327,00	334,24	727,28	338,32	337,58	334,24	167,96	245,96
Valor 2	619,64	320,46	325,68	713,08	331,24	329,01	325,68	166,28	237,16
Valor 3	626,97	323,75	329,93	719,95	334,23	333,24	329,93	165,41	241,53
Média	626,75	323,74	329,95	720,10	334,60	333,28	329,95	166,55	241,55
Desvio Padrão	7,00	3,27	4,28	7,10	3,55	4,28	4,28	1,30	4,40

Fonte: o autor.

Figura 40: Representação dos intervalos do limite de escoamento para o aço 5115, 5140 e 5160, como recebido, tratado termicamente no ciclo padrão – ESFERO1 e tratado termicamente no ciclo proposto – ESFERO2.



Fonte: o autor.

4.5 GRAU DE ESFEROIDIZAÇÃO

Pode-se demonstrar que a taxa de esferoidização está diretamente relacionada com a difusão do carbono na ferrita e que a mesma decresce com o crescimento do tamanho

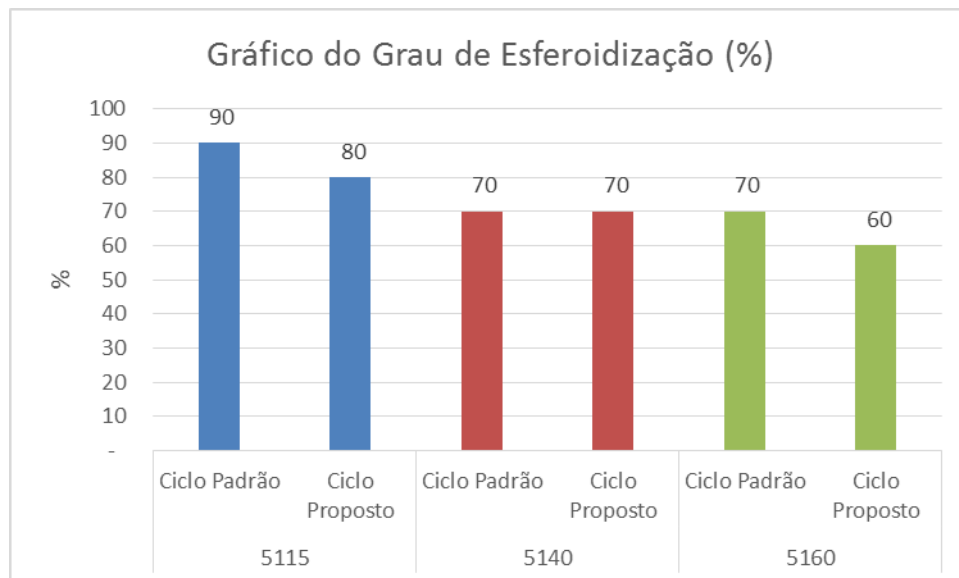
médio da partícula. Elementos de liga diminuem a taxa de difusão de carbono na ferrita (coeficiente de difusão) e, portanto, a taxa do processo de esferoidização. Se o aço contiver elementos formadores de carbonetos, ocorre o mesmo efeito, reduzindo fortemente a taxa de esferoidização. A esferoidização das partículas de cementita presentes na perlita tem um efeito determinante no resultado de propriedades mecânicas dos aços médio carbono.

Conforme pode ser visto no gráfico da Figura 41, o tratamento térmico das amostras no ciclo proposto, ESFERO2, reduziu de 90% para 80% o grau de esferoidização do aço 5115. O resultado de 80% é considerado um bom percentual de esferoidização. Dessa forma, o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

O gráfico da Figura 41 não mostra variação no grau de esferoidização com relação aos ciclos de tratamento térmico, padrão e proposto, do aço 5140. Este efeito decorre do fato de que os dois experimentos seguiram a mesma rota de tratamento térmico, pois os tratamentos são coincidentes, o ESFERO2. Este apresentou um grau de esferoidização de 70%.

Conforme observado na Figura 41, o tratamento térmico das amostras no ciclo proposto, ESFERO2, reduziu de 70% para 60% o grau de esferoidização do aço 5160. O resultado de 60% é considerado o limite do aceitável para o grau de esferoidização do aço 5160 pela norma NBR14677:2001. Dessa forma, o grau de esferoidização também é aceito para o aço 5160, o que valida o experimento realizado.

Figura 41: Representação dos intervalos do grau de esferoidização para o aço 5115, 5140 e 5160, tratados termicamente nos ciclos padrão – ESFERO1, ESFERO2 E ESFERO3 e tratados termicamente no ciclo proposto – ESFERO2.



Fonte: o autor.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas neste trabalho é possível chegar às seguintes conclusões:

- A partir dos dados de dureza obtidos para os aços AISI 5115, 5140 e 5160, estudados neste trabalho, pode-se perceber que o novo ciclo proposto, ESFERO2, atende às necessidades de redução de dureza produzido pelo tratamento de esferoidização. Dessa forma, pode-se alterar o ciclo de tratamento destes aços para o ciclo proposto, sem alterações nas características de dureza exigidas pelas normas técnicas para esta finalidade.
- A partir das microestruturas obtidos para os 3 aços estudados, pode-se perceber que o ciclo proposto, ESFERO2, atende a estes aços, 5115, 5140 e 5160. Há uma observação importante de ser feita para o grau de esferoidização do aço 5160 que se reduziu de 70% no tratamento padrão para 60% no novo tratamento proposto: o grau de esferoidização de 60% ainda é um bom resultado, porém, está no limite da norma para este aço. Dessa forma, é recomendado realizar testes com um número maior de amostras para melhorar a acurácia dos resultados do grau de esferoidização para o aço 5160 e para garantir que ele não irá reduzir este grau de esferoidização para valores inferiores a 60%. Mesmo com esta redução no grau de esferoidização encontrado no aço 5160, pode-se alterar o ciclo destes aços para o ciclo proposto, pois estes se encontram dentro dos limites exigidos pelas normas.
- A partir dos dados obtidos com o ensaio de tração para os aços AISI 5115, 5140 e 5160, pode-se perceber que o ciclo proposto, ESFERO2, atende às necessidades de propriedades mecânicas exigidas pela norma. Após o tratamento de esferoidização, pelos processos padrões ou o novo ciclo proposto, não houve diferenças significativas nos valores de Limite de Escoamento, Limite de Resistência, Alongamento ou Estricção. Existe uma ressalva, para o limite de escoamento do aço 5160 que, ao alterar o tratamento de esferoidização do ESFERO3 para o proposto, teve uma diminuição na redução do limite de escoamento, de 52% para 27%, em relação ao material bruto. Dessa forma é recomendado realizar testes com mais amostras e acompanhar os resultados do

limite de escoamento para o aço 5160, para garantir que ele não irá aumentar além do valor apresentado. Mesmo com o desvio encontrado no limite de escoamento do aço 5160, pode-se alterar o ciclo de ambos os aços para o ciclo proposto, mantendo-se dentro das especificações exigidas pelas normas técnicas.

- O custo do tratamento térmico de esferoidização, avaliado neste estudo, é semelhante ao observado no processo de laminação do material, isso justifica a análise de ciclos de tratamento térmico e a otimização dos mesmos. Com a validação da utilização do ciclo ESFERO2 para o aço 5115 ganha-se 01h12min e para o aço 5160, 2h39 min.. Ambos os ganhos são muito representativos para o custo do forno de tratamento térmico de bobinas e a redução de custo estudada justifica os esforços para a utilização do ciclo ESFERO2 também para os aços 5115 e 5160. Deve-se ainda considerar o significativo ganho em setup de um ciclo para o outro que segundo o padrão é de 06h00, dessa forma o ganho pode chegar a 08h39min.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A.J.; HASHIMOTO, T.M.; MOURA NETO, C.; MONTEIRO, W.A.; **Proceedings of de Eight International Fatigue Congress**, 4 (2002) p. 2263 – 2270.
- ABDALLA A. J.; BAGGIO-SCHEID V. H.; BAPTISTA A. C. R.; BARBOSA M. J. R. **Melhoria nas propriedades de um aço de baixo carbono tratado termoquimicamente a plasma**, In: 8º CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Anais..., Cusco: VIII CIBIM, 2007.
- ABM, vol. 40, n. 316, 1984.
- ABNT NBR-6152 – **Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas – 22 paginas.
- ABNT NBR-6394 – **Determinação da Dureza Brinell**. Associação Brasileira de Normas Técnicas – 12 paginas.
- AIHARA, K. A . **New Termomechanical Processing of Spheroidization Carbide Directly in a Rolling Line**, 33rd Mech. Working and Steel Processing Conference **Proceedings**. Vol. 29, USA, The Iron and Steel Society, Inc., p.285-290.
- AIHARA, K.; KANBARA, S. **Influence of Prior Scrtuture Upon Spheroidization Rate and Cold Forgeability of Annealed Wire**, The Sumimoto Search, n. 42, 1990. p. 1-8.
- Anderson Luis Pavoski, Carlo Magno Cardoso de Jesus Rodrigo Luís Ribeiro: **DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO, DIAGRAMA Fe-C PARA AÇOS E FERRO FUNDIDO, FRATURA E FADIGA**. Joinville 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14677: Aços - **Determinação do grau de esferoidização de carbonetos** – Método de Ensaio. 1. ed. Rio de Janeiro, abr. 2001. 21p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152: **Materiais Metálicos: ensaios de tração à temperatura ambiente**. 1. ed. Rio de Janeiro, mai. 1992. 35p.
- ASTM A 370-7 Mechanical Testo f Stell Products, **Annual Book of ASTM Standards**, USA: ASTM, 1997.

ATKINSON, M. **Ultra Rapid Annealing Of Low Carbon Steel**; Material Fórum; v.17, 1993. p. 181 – 208.

AVISHAN, B.; GARCÍA-MATEO, C.; YAZDANI, S.; CABALLERO, F.G. **Retained austenite thermal stability in a nanostructured bainitic steel. Materials Characterization**, Tabriz, v.81, p.105-110, apr. 2013.

BECKER, Renata Helena Santer, **Estudo da influência da taxa de resfriamento e temperatura nos últimos passes de laminação de fio máquina sobre a resposta ao tratamento térmico de esferoidização em um aço DIN 41Cr4** . 2012. 86 f..Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BOOT, I. S. **Tendências e inovações em aços. Estudo prospectivo do setor siderúrgico**. Nota técnica. Centro de gestão e estudos estratégicos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM. 44p. Brasília. 2008.

BROOKS, Charlie R. **Microstructural observations of spheroidization from a lamellar structure in iron meteorites** Material Science and Engineering Department, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA Received 1 January 1999; accepted 1 January 2000.

CALLISTER. W. D.jr., **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. LTC Editora, Rio de Janeiro (2002).

CHADWICK, G.A. **Metallography of Phase Transformation**. London: Butterworth Ltda., 1972. P. 233-238.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos** – 7. ed. ampliada e revisada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p.

COELHO A. R. Z. **Aspectos da Esferoidização de Aços Médios Carbono**. I seminário da COMFIT, Mai, 1980.

CONGRESSO ABM. Rio de Janeiro, Jul. 2000.

COUTINHO, C. A. B., BARBOSA R. **Cinética de esferoidização do Aço SAE 52100 com Estrutura Prévia de Normalização**. SEMINÁRIO METALURGIA E TRATAMENTO TERMICO. Angra dos Reis, Jun. 1988.

COUTINHO, C. A. B., BOZZI, A. C. POLANCZYK, C. A. P. OLIVEIRA, P. M. C. **Efeitos do Recozimento de Recristalização Sobre a Morfologia da Cementita em Aços Carbono**. XLV CONGRESSO ABM. Rio de Janeiro, Set. 1990.

COUTINHO, C.A.B., NETO, P.P.S, GEBER, L.P. **Aceleração Do Processo De Esferoidização Do Aço Perlitico Por Deformação à Frio**; Metalurgia – ABM;vol. 35; n.260;1979.

CREE, A. M.; FULKNER, R. G.; LYNE, A. T. **Cementite Coarsening During Spheroidisation of Bearing Steel SAE 52100**; Materials Science and Tecnology, 566, 5, 1995.

CUNHA, A.L.M. SANTOS, R.J.M., SANTOS, D.B. **Influence of Previous Microstructure on the Spheroidization Rate of Medium Carbon Low Alloy Chromium Steel Wire Rods**, 49 th International Congress on the Tecnology of Metals and Materials, Physical Metallurgy, vol. II, São Paulo, 1994.

DRUMOND, A.L.F., ABDALLAa, A.J., MOURA NETO, C.M., HASHIMOTO, T.M., HEIN, L.R. **Mechanical Characterization of a Steel AISI 43100 Submitted to Different Routes of Heat Treatments**. Materials Science Forum Vol. 802 (2014) pp 373-376, 2014.

FAGUNDES, Edson José, **Análise da influência do recozimento de esferoidização nas propriedades mecânicas do aço SAE 1050**. 2006. 62 f..Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

GANG, U. G., LEE, J. C., NAM, W. J., **Effect of Prior Microstructures on the Behavior of Cementite particles during subcritical annealing of medium carbon steels**, *Metal and Materials International*, Vol. 15, N°5, p. 719-725, 2009.

HISSANAGA, Bruna Melina Marques de Souza, **Variáveis do Processo Termomecânico que influenciam na relação elástica do vergalhão CA-60**. 2013. 96 f..Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

HONGSHUANG, Di et al, **Spheroidizing kinetics of eutectic carbide in the twin rollcastingof M2 high-speed steel**, State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110006, China.,July 2004.

JUNIOR, P. C. H., FONSECA, J. E. F, DICK, L. F. P., **Desenvolvimento de metodologia para avaliação de aços esferoidizados**. Parte 1: determinação do grau de descarbonetação.

KARADENIZ, Erdal Department of Mechanical Engineering, **Engineering Faculty**, Sakarya University, Esentepe Campus, 54187 Sakarya, Turkey Received 23 March 2006; accepted 21 November 2006; Available online 30 March 2007.

Kinetics in High Carbon Steels, Journal of Materials Processing Technology, vol.82, 1998.p.142-150. NERI, N. A.; COLAS, R.; VALTIERRA, S. Effect of Deformation on Graphitization

LESLIE, W. C. **The Physical Metallurgy of Steels**”. 1 ed. McGraw-Hill International Student Edition, 1982. 396p.

LUZGINOVA, N. V., ZHAO, L., SIETSMA, J., **The cementite spheroidization process in high carbon steels with different chromium contents**, Metallurgical and Materials Transactions A, s. l., Vol. 39A, p. 513-521, 2013.

Metals Handbook, **Heating Treating: Annealing of Steel**, 8aed., v.2, USA, ASTM Intern., 1994. P. 42-55.

MORALES, R. D., LÓPEZ, A. G., OLIVARES, I. M., **Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods**. ISIJ International, Puebla, vol. 30, n. 1, p. 48-57, set. 1990.

OHASHI, Y.; WOLFENSTEIN, J.; KOCH, R.; SHERBY, O.D. **Fracture Behavior os a Laminated Steel-Brass Composite in Bend Tests**. Materials Science and Engeneering, A151,1992. p. 37 – 44.

PADILHA,A.F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. São Paulo: ABM,1996. 158 p.

PERUCH, Fábio, **Influência do ciclo de recozimento para esferoidização nas propriedades mecânicas do aço ABNT 5160**. 2009. 88 f..Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PLENTZ, Rafael Schumacher, **Otimização do processo de resfriamento do aço mola SAE 9254 durante laminação** . 2009. 49 f..Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982, p. 288-272.

ROCHA, M. R.; OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação dos Parâmetros Microestruturais de um Aço SAE 1045 esferoidizado e sua Correlação com as propriedades Mecânicas.** LV

ROSSI, H. E., COTINHO, C. A. B. **Influência das Variáveis de Processamento na Esferoidização do Aço SAE 52100.** METALURGIA-ABM, v. 39, n. 310, Set.1983.

SAKUMA, Y.; MATSUMARA, O.; TAKECHI, H. **Mechanical properties and retained austenite in intercritically heat-treated bainite-transformed steel and their variation with Si and Mn additions.** Metallurgical Transactions A, v.22A, p.489-498, 1991.

SCHASTLIVTSEV, V.M.; YAKOVLEVA, I.L. **Structural Transformation in Perlite Upon Heating: III. Spheroidization of Carbides; Gibbs-Thomson Equation and the Problem of Carbide Coagulation; The Physics of Metals and Metallography,** Vol. 78, n.3, 1994. p.317 324.

SHKATOV, V.V.; CHERNYSHEV, A.P.; LIZUNOV, V.I. **Kinetics of Pearlite Spheroidization in Carbon Steel. Author Affiliation:** Lipetsk Polytechnical Institute. Physics Of Metals And Metallography (USSR) 70, (4), 1990. P. 116-121.

SILVA, Fábio Adriano, **Efeito do resfriamento controlado após a laminação a quente nas propriedades mecânicas e na microestrutura de um fio máquina alto carbono com cromo.** 2007. 82 f..Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVÉRIO, Valdir Anderson, **Estudo da evolução do tamanho de grão na laminação a quente de barras de aço médio carbono microligado ao vanádio 38MnSiV5.** 2008. 88 f..Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SYN, C. K.; LESUER, D. R. e SHERBY, O. D.; **Metallurgical and Materials Transactions,** 25A, n.1481, 1994.

Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, vol. 6, n. 3, p. 153-157, jan.-mar., 2010.

THELNING, K. E. **Steels And Its Heat Treatment,** 2aed., Butherworths, Mackays of Great Britain: Chatham Ltd., 1984.