

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo será disponibilizado somente a partir de 25/08/2019.



**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"

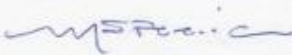
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

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 mecânicos	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 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).

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.