

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
será disponibilizado somente a partir
de 11/12/2022.



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

MANUEL VITOR DA CRUZ FERREIRA MACIEL

**Estudo da influência do tempo de ciclo térmico de reaquecimento nas propriedades
mecânicas e microestrutura dos aços SAE 5120.**

Guaratinguetá
2020

Manuel Vitor da Cruz Ferreira Maciel

Estudo da influência do tempo de ciclo térmico de reaquecimento nas propriedades mecânicas e microestrutura dos aços SAE 5120.

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. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá
2020

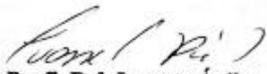
M152e	<p>Maciel, Manuel Vitor da Cruz Ferreira</p> <p>Estudo da influência do tempo de ciclo térmico de reaquecimento nas propriedades mecânicas e microestrutura dos aços SAE 5120 / Manuel Vitor da Cruz Ferreira Maciel – Guaratinguetá, 2020.</p> <p>97 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 97</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira</p> <p>1. Laminação (Metalurgia). 2. Aço de alta resistência. 3. Propriedades mecânicas. I. Título.</p> <p>CDU 621.771(043)</p>
-------	--

MANUEL VITOR DA CRUZ FERREIRA MACIEL

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

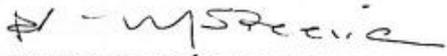
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO**

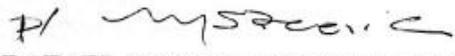
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. RAFAEL HUMBERTO MOTA DE SIQUEIRA
CTA

Dezembro de 2020

DADOS CURRICULARES

MANUEL VITOR DA CRUZ FERREIRA MACIEL

NASCIMENTO	08.05.1990 – SÃO ROQUE / SP
FILIAÇÃO	Manuel da Cruz Ferreira Maciel Zelia da Cruz Maciel
2009/2014	Curso de Graduação em Engenharia de Materiais Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2019/2020	Curso de MBA em Gestão de Negócios IBMEC.

*À toda a minha família,
Em especial aos meus pais Manuel da Cruz Ferreira Maciel e Zelia da Cruz Maciel.*

AGRADECIMENTOS

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

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira*, que me incentivou ao longo desta dissertação. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado não existiria;

” O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis. ”

José de Alencar

RESUMO

O constante aumento da competitividade do setor siderúrgico demanda cada vez mais esforços para a redução dos custos de produção. Este trabalho se propõe a estudar ciclos de reaquecimento capazes de produzir com eficiência e redução de custo, lingotes adequadamente aquecidos, com temperatura homogênea o suficiente para ser laminado em barras redondas de aço especial. Os ciclos de reaquecimento foram aplicados no aço SAE 5120. Após a preparação das corridas foram utilizados ciclos de reaquecimento alterando o tempo de permanência em forno, de forma a obter lingotes capazes de sofrer os processos posteriores de conformação, mantendo a integridade dos equipamentos e requisitos de qualidade das barras produzidas. 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. Foi testado um ciclo com características próximas as do padrão e outros dois ciclos em condições extremas. Os resultados mostraram que o Ciclo A, 410 minutos, apresentou propriedades mecânicas semelhantes às do Ciclo Padrão, porém, com menor custo de produção e tempo de reaquecimento. O ciclo na condição Ciclo B, 360 minutos, apresentou uma estrutura com grãos menores, mas o processo produtivo com esse ciclo mostrou-se instável e impraticável em escala de produção contínua, podendo comprometer a integridade dos equipamentos produtivos. Os materiais processados no Ciclo C, 800 minutos, apresentaram propriedades mecânicas próximas as da condição Padrão, mas o ciclo mostrou se insatisfatório operacionalmente.

PALAVRAS-CHAVE: Laminação. Lingotes. Conformação. Aços Especiais. Competitividade.

ABSTRACT

The constant increase in the competitiveness of the steel industry demands more and more efforts to reduce production costs. This work proposes to study reheating cycles capable of producing efficiently and cost-saving ingots, which are adequately heated, with a temperature homogeneous enough to be rolled in special steel round bars. The reheating cycles were applied to SAE 5120 steel. After the preparation of the heats, reheating cycles were used, changing the time spent in the furnace, in order to obtain ingots capable of undergoing the later forming processes, maintaining the integrity of the equipment and quality requirements of the bars produced. To measure the mechanical properties, hardness and tensile tests were performed. The microstructure was studied from samples prepared metallographically and analyzed by optical microscopy. One cycle was tested with characteristics close to the standard and two other cycles under extreme conditions. The results showed that Cycle B, 410 minutes, presented mechanical properties similar to those of the Standard Cycle, however, with lower production cost and reheating time. The cycle in the Cycle C condition, 360 minutes, presented a structure with smaller grains, but the production process with this cycle proved to be unstable and impractical on a continuous production scale, which could compromise the integrity of the production equipment. The materials processed in Cycle D, 800 minutes, had mechanical properties close to those of the Standard condition, but the cycle was operationally unsatisfactory.

KEYWORDS: Rolling Mill. Ingots. Conformation. Special Steels. Competitiveness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição química da família de aços 51XX.....	17
Figura 2 - Componentes produzidos com aço SAE 5120.....	18
Figura 3 - Composição química do aço SAE 5120.	19
Figura 4 - Fluxograma simplificado de produção em uma usina siderúrgica.	19
Figura 5 - Montagem esquemática para vazamento inferior.	20
Figura 6 - Os cinco principais tipos de moldes para lingotes.....	21
Figura 7 - Cortes transversais das principais formas de lingoteiras.	22
Figura 8 - a) Representação esquemática da variação do tipo de estrutura de um lingote solidificado; b) uma macroestrutura real.....	23
Figura 9 - Formas e tamanhos relativos de placas, blocos e tarugos.....	25
Figura 10 - Comportamento da temperatura da parede refratária de um forno ao longo do tempo de início de aquecimento.....	27
Figura 11 - Análise química da Dunita.....	30
Figura 12 - Seção transversal esquemática de uma instalação com forno poço.....	32
Figura 13 - Planta esquemática de um forno poço típico.	34
Figura 14 - Diferentes localizações de queimadores em fornos poço	35
Figura 15 - Vista superior e lateral de um forno poço de chama única.	38
Figura 16 - Os dois tipos de crescimento de grão durante o processo de reaquecimento	39
Figura 17 - Comportamento da temperatura do lingote nos períodos entre lingotamento e início de laminação.....	42
Figura 18 - Leito de resfriamento do tipo Pente Móvel.	44
Figura 19 - <i>Layout</i> de uma aciaria de aços especiais.....	45
Figura 20 - Início do processo de lingotamento convencional.....	46
Figura 21 - Lingoteiras com aço após o processo de solidificação.	47
Figura 22 - Layout do laminador de perfis pesados	48
Figura 23 - Desenformamento de lingotes no forno poço.	49
Figura 24 - Conformação de lingote no laminador desbastador.....	50
Figura 25 - Escarfagem de bloco.....	51
Figura 26 - Corte das extremidades do bloco escarfado.....	52
Figura 27 - Conformação do bloco no laminador acabador.	53
Figura 28 - Corte das barras laminadas.	54

Figura 29 - Resfriamento das barras laminadas.....	55
Figura 30 - Processo de de inspeção por partículas magnéticas.....	56
Figura 31 - Remoção de defeito superficial.....	57
Figura 32 - Barra após a remoção dos defeitos superficiais.....	58
Figura 33 - Ciclo de reaquecimento padrão utilizado para o aço 5120 enornado a quente.....	64
Figura 34 - Ciclo de reaquecimento A utilizado para o aço 5120 enornado a quente. .	65
Figura 35 - Ciclo de reaquecimento B utilizado para o aço 5120 enornado a quente...	66
Figura 36 - Ciclo de reaquecimento C utilizado para o aço 5120 enornado a quente...	67
Figura 37 - Operação de corte em serra de fita.....	68
Figura 38 - Microscópio LEICA DMLM.	69
Figura 39 - Durômetro Heckert.	70
Figura 40 - Máquina Universal de Ensaio modelo ECC.....	71
Figura 41 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo Padrão.....	74
Figura 42 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo A.....	75
Figura 43 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo B.	76
Figura 44 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo C.	77
Figura 45 - Representação dos intervalos de dureza (HB) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.....	78
Figura 46 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de dureza.	78
Figura 47 - Intervalos de limite de resistência (MPa) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.....	80
Figura 48 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de resistência.....	80
Figura 49 - Intervalos de estrição (%) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C...	82
Figura 50 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de estrição.....	82
Figura 51 - Representação dos intervalos de alongamento (%) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.	84
Figura 52 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de alongamento.	84
Figura 53 - Representação dos intervalos de limite de escoamento (MPa) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.....	85
Figura 54 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de escoamento.....	86
Figura 55 - Porcentagem de carga média do <i>Bloom</i> para cada um dos ciclos.....	87
Figura 56 - Porcentagem de carga média do <i>Billet</i> para cada um dos ciclos.	88
Figura 57 - Peso de carepa formado em cada ciclo.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor calorífico aproximado dos gases combustíveis.....	33
Tabela 2 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo Padrão.....	61
Tabela 3 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo A.	61
Tabela 4 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo B.	62
Tabela 5 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo C.	62
Tabela 6 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição Padrão.....	64
Tabela 7 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição A.	65
Tabela 8 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição B.	66
Tabela 9 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição C.	67
Tabela 10 - Valores do tamanho de grão obtido para cada amostra do aço 5120 nas quatro condições de processamento.	73

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	AÇOS LIGA	16
2.1.1	Família 51XX	17
2.1.1.1	SAE 5120.....	18
2.2	CLASSIFICAÇÕES DE USINAS SIDERÚRGICAS	19
2.3	LINGOTAMENTO CONVENCIONAL	19
2.3.1	Estrutura bruta de solidificação no processo de lingotamento convencional.	22
2.4	PLACAS, BLOCOS E TARUGOS.....	24
2.5	FORNOS DE REAQUECIMENTO.....	25
2.5.1	Transferência de calor em fornos de reaquecimento	26
2.5.1.1	Condução	26
2.5.1.2	Convecção	28
2.5.1.3	Radiação	29
2.5.2	Reaquecimento em lingotes	29
2.5.3	Layout geral das instalações dos fornos poço	31
2.5.3.1	Projeto de um forno Poço	33
2.5.3.2	Refratário	36
2.5.3.3	Tipos de Forno Poço.....	36
2.5.3.3.1	<i>Fornos poço de chama única</i>	38
2.5.4	Objetivo do processo de reaquecimento	38
2.5.4.1	Requisitos para o processo de reaquecimento	39
2.5.5	Transferência de calor em lingotes.	41
2.6	CONDICIONAMENTO POR ESCARFAGEM	43
2.7	LEITO DE RESFRIAMENTO.....	43
2.8	PROCESSO PRODUTIVO	44
2.8.1	Fusão e preparo do aço	44
2.8.2	Reaquecimento e laminação	47
2.8.3	Inspeção e acabamento	55

3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	MATERIAIS	59
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	59
3.3	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	63
3.4	REAQUECIMENTO E LAMINAÇÃO	63
3.4.1	Ciclo de reaquecimento Padrão para o aço 5120	63
3.4.2	Ciclo de reaquecimento A para o aço 5120	64
3.4.3	Ciclo de reaquecimento B para o aço 5120	65
3.4.4	Ciclo de reaquecimento C para o aço 5120	66
3.5	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	67
3.6	ENSAIOS METALOGRÁFICOS E ENSAIOS MECÂNICOS	68
3.6.1	Determinação do Tamanho de Grão	69
3.6.2	Ensaio mecânicos	69
3.6.2.1	Ensaio de dureza	69
3.6.2.2	Ensaio de Tração	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1	TAMANHO DE GRÃO	72
4.2	ENSAIO DE DUREZA (HB)	77
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO	79
4.3.1	Limite de Resistência (MPa)	79
4.3.2	Estricção	81
4.3.3	Alongamento	83
4.3.4	Limite de escoamento	85
4.4	CARGA DOS MOTORES (%)	87
4.5	PESO DE CAREPA FORMADO (KG)	88
4.6	DISCUSSÃO	89
5	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

Antes de se iniciar o processo de conformação, há a etapa de reaquecimento. Sua função principal é elevar a temperatura dos produtos semi-acabados (lingotes, tarugos ou placas), até que o material esteja suficientemente plástico e homogêneo para permitir a redução mecânica ao perfil desejado.

A laminação, em geral, apresenta custos bastante elevados quando comparado aos processos de conformação posteriores. O reaquecimento é a etapa de maior custo de um laminador, podendo chegar a 60 por cento do custo total. Além disso, por conceito de projeto, os fornos são o gargalo do processo de laminação. Assim, aumentar a capacidade produtiva de um laminador muitas vezes exige a otimização dos ciclos de reaquecimento.

Com a grande concorrência existente na indústria automobilística, a pressão por 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 ciclos térmicos e os processos de conformação vêm sendo bastante estudados no intuito de aumentar produtividade via redução de tempos de ciclo, ou mesmo aumento do tamanho das cargas reaquecidas.

Deve ser considerado que a redução excessiva do tempo de reaquecimento pode gerar dificuldades no processo de conformação, defeitos superficiais e alteração nas propriedades mecânicas dos produtos laminados. Isso ocasiona excesso de manutenção dos equipamentos, recondicionamento das barras laminadas e não atendimento dos requisitos dos clientes.

A redução do tempo dos ciclos de reaquecimento também reduz a emissão de gases para o meio ambiente.

1.1 OBJETIVO

O objetivo da pesquisa foi realizar o estudo de diferentes ciclos de reaquecimento de aços SAE 5120 para laminação a quente. Espera-se obter um ganho de produtividade e consumo de combustível, reduzindo o tempo total de reaquecimento sem reduzir o

desempenho do material e nível de segurança operacional. Objetiva-se, também, manter as propriedades mecânicas e microestrutura do material na faixa aceitável pelos clientes.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica devido ao aumento da disputa da indústria mundial. As indústrias de base, como a siderúrgica e a automobilística buscam o aumento da competitividade. Com isso se tornou importantíssimo reduzir os custos de produção para manter o segmento sustentável economicamente e competitivo frente aos concorrentes. O reaquecimento é a etapa de maior custo da laminação, isso justifica a análise de ciclos de reaquecimento e a otimização dos mesmos.

5 CONCLUSÕES

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

- Em todos as ordens de produção testadas, as propriedades atenderam a especificação internas.
- A condição A apresentou resultados semelhantes a condição Padrão, porém com um tempo de ciclo de reaquecimento 90 minutos menor e sem esforços maiores nos Laminadores *Bloom* e *Billet*, passando o tempo total de ciclo de 500 para 410 minutos.
- A condição B mostrou se impraticável em condições normais de operação do laminador em questão. Os equipamentos têm suas capacidades levadas a máxima e necessitam de acompanhamento específico durante o processamento de lingotes com esse ciclo de reaquecimento. Além disso, após o Laminador *Bloom*, as barras chegam com temperatura bem próxima da faixa inferior, aumentando a possibilidade de geração de defeitos superficiais.
- A partir das microestruturas obtidas para as 4 condições, pode se dizer que o menor tempo de reaquecimento promoveu uma estrutura de menor tamanho de grão na condição B. Isso foi possível devido a menor temperatura do material durante as etapas de conformação nos laminadores. Consequentemente, o menor tamanho de grão promoveu uma melhora nas propriedades mecânicas, conforme demonstra a lei de Hall-Petch. (AZIMI; BRITZ; ENGSTLER; FRITZ; MUCKLICH, 2018)
- A condição C se mostrou insatisfatória operacionalmente. Além de diminuir a capacidade produtiva dos fornos e aumentar o consumo de gás combustível, esse ciclo gerou materiais com maior quantidade de óxido de ferro (carepa) que se acumulam no fundo dos fornos e na linha de laminação, tendo que serem limpos posteriormente. Também foi notado uma elevada quantidade de barras com rebarbas do corte, tal efeito ocasionado pela maior temperatura de chegada das barras na Serra a Quente.
- Somente a condição A foi capaz de atender, simultaneamente, os objetivos de obter um ganho de produtividade e consumo de combustível, reduzindo em 18% o tempo total de reaquecimento sem reduzir o desempenho do material e nível de

segurança operacional. Dessa forma pode se alterar o ciclo de reahecimento desse aço para a condição denominada A.

REFERÊNCIAS

- ADEBI, H.R.; HANZAKI, A. Z.; LIU, Z.; XIN, R.; HAGHDADI, N.; HODGSON, P. D. Continuous dynamic recrystallization in low density steel. **Materials Science and Engineering**, Tehran, v. 114, n. 15, p. 55-61, jan. 2017.
- ANDERSEN, I.; GRONG, O. Analytical modelling of grain growth in metals and alloys in the presence of growing and dissolving precipitates: I. normal grain growth, **Acta Metallurgica et Materialia**, Trondheim, v. 43, n. 7, p. 2673-2688, jul. 1995.
- ASKELAND, D. R.; PHULE, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152**: materiais metálicos: ensaios de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 35p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6506**: ensaio de dureza Brinell. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1**: determinação das propriedades mecânicas à tração de materiais metálicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 70p.
- AZIMI, S. M.; BRITZ, D.; ENGSTLER, M.; FRITZ, M.; MUCKLICH, F. Advanced steel microstructural classification by deep learning methods, **Scientific Reports**, Saarbrücken, v. 8, n. 3, p 2128-2142, feb. 2018.
- BARTOLOMEU, F.; BUCIUMEANU, M.; PINTO, E.; ALVES, N.; CARVALHO, O.; SILVA, F. S.; MIRANDA, G. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior: a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. **Additive Manufacturing**, Guimarães, v. 16, n. 23, p. 81-89, may 2017.
- BECKER, R. H. S. **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. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2002. 589 p.
- CHEN, W.; VOISIN, T.; ZHANG, Y; FLORIEN, J.; SPADACCINI, C. M.; MCDOWELL, D. L.; ZHU, T.; WANG, Y. M. Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel. **Nature Communications**, Livermore, v. 10, n. 4338, p.323 - 327, sep. 2019.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599 p.

CHOI, H.; LEE, S.; LEE, J.; BARLAT, F.; COOMAN, B. C. Characterization of fracture in medium Mn steel. **Materials Science and Engineering**, Nam-Gu, v. 687, n. 27, p. 200-210, feb. 2017.

CONRAD, H. Grain-size dependence of the flow stress of Cu from millimeters to nanometers. **Metallurgical and Materials Transactions**, Raleigh, v. 35, n. 3, p. 2681-2695, sep. 2004.

DAO, M.; LU, L.; ASARO, R.; HOSSON, J. T. M.; MA, E. Toward a quantitative understanding of mechanical behavior of nanocrystalline metals. **Acta Materialia**, Baltimore, v. 55, n. 143, p. 4041-4065, mar. 2007.

GHADAMGAHI, M.; OLUND, P.; LUGNET, A.; SAFFARI, M.; YANG, W. Design optimization of Flameless-Oxyfuel soaking pit furnace using CFD technique, **Energy Procedia**, Stockholm, v. 61, n. 6, p. 611-614, jun. 2014.

GIGA, A.; KIMOTO, Y.; TAKIGAWA, Y.; HIGASHI, K. Demonstration of an inverse Hall–Petch relationship in electrodeposited nanocrystalline Ni–W alloys through tensile testing, **Scripta Materialia**, Osaka, v. 55, n. 2, p. 143-146, may. 2006.

GOME, T. E. **Efeitos da temperatura de laminação na formação e na reversão de martensita induzida por deformação no aço inoxidável austenítico AISI 304L**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GORNI, A. A.; SILVA, M. R. S. Evolução do tamanho de grão austenítico durante a laminação de tiras a quente de aço microligados ao nióbio. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 109-114, abr. 2015.

HAN, S. H.; CHANG, D.; HUH, C. Efficiency analysis of radiative slab heating in a walking-beam-type reheating furnace. **Energy**, Daejeon, v. 36, n. 2, p.1265-1272, feb. 2011.

HISSANAGA, B. M. M. S. **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.

HU, J.; SHI, Y. N.; SAUVAGE, X.; SHA, G.; LU, K. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals. **Science**, Nanjing, v. 355, n. 6331, p. 1292-1296, mar. 2017.

HUANG, C. X.; HU, W. P.; WANG, Q. Y.; WANG, C.; YANG, G.; ZHU, Y. T. Na ideal ultrafine-grained structure for high strength and high ductility, **Materials Research Letters**, Chengdu, v. 3, n. 2, p. 88-94, jan. 2015.

KEENER, E. L.; BOGGS, W. E.; BRIDGES, W. **Blast-furnace gas enrichment control**. Documento apresentado no 1980 IEEE Mid'con Professional Program, de 4 a 6 de novembro de 1980.

KEMP, A. Estudo do efeito da composição química e dos parâmetros de lingotamento na ocorrência de trincas em barras laminadas: RCTM. *In*: SEMINÁRIO DE ACIARIA, FUNDIÇÃO E METALURGIA DE NÃO-FERROSOS, 48., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2017. p. 447-455.

KIN; M. Y. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Chonbuk, v. 50, n. 19, p. 3740-3748, sep. 2007.

KREITH F.; MANGLIK R. M.; BOHN M. S. **Princípios da transferência de calor**. 7. ed. São Paulo: Cengage, 2010. 676 p.

KRZYZANOWSKI, M.; BEYNON, J. H.; FARRUGIA, D. C. J. **Oxide scale behavior in high temperature metal processing**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010. 386 p.

LESLIE, W. C. **The physical metallurgy of steels**. Auckland: McGraw-Hill, 1982. 396 p.

LINO, J. J. P. **Laminação controlada de um aço microligado ao nióbio visando a obtenção do grau API X60 em laminador Steckel**. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

LIU, X.; YUAN, F.; WEI, Y. Grain size effect on the hardness of nanocrystal measured by the nanosize indenter. **Applied Surface Science**, Beijing, v. 279, n. 15, p. 159-166, aug. 2013.

MA, E.; ZHU, T. Towards strength-ductility synergy through the design of heterogeneous nanostructures in metals. **Materials Today**, Baltimore, v. 20, n. 6, p. 323-331, jul. 2017.

MEYERS, M. A.; MISHRA, A.; BENSON, D. J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. **Progress in Materials Science**, San Diego, v. 51, n. 4, p. 427-556, may. 2006.

MORRIS, J. W. **The influence of grain size on the mechanical properties of steel**. 2001. 8 f. Dissertação (Materials Science and Engineering) – University of California, California, 2001.

ODNOBOKOVA, M.; KIPELOVA, A.; BELYAKOV, A.; KAIBYSHEV, R. Microstructure Evolution um a 312L stainless steel subjected to multidirectional forging and unidirectional bar rolling. **IOP conference series: materials science and engineering**, Belgorod, v. 6, n. 63, p. 120-129, oct. 2014.

OHASHI, Y.; WOLFENSTEIN, J.; KOCH, R.; SHERBY, O.D. Fracture behavior of a laminated steel-brass composite in bend tests. **Materials Science and Engineering**, A151, p. 37-44, may. 1992.

PADILHA, A. F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. São Paulo: ABM, 1996. 158 p.

PLENTZ, R. S. **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.

QIN, W.; LI, J.; LIU, Y.; KANG, J.; ZHU, L.; SHU, D.; PENG, P.; SHE, D.; MENG, D.; LI, Y. Effects of grain size on tensile property and fracture morphology of 316L stainless steel. **Materials Science and Engineering**, Beijing, v. 254, n. 12, p. 116-119, nov. 2019.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 2008. 776 p.

ROBERTS, W. L. **Hot Rolling of steel: manufacturing engineering and materials processing**. 10. ed. New York: Marcel Dekker, 1983. 1040 p.

SCHUH, C.; NIEH, T.; YAMASAKI, T. Hall - Petch breakdown manifested in abrasive wear resistance of nanocrystalline nickel. **Scripta Materialia**, Hyogo, v. 46, n. 10, p. 735-740, may. 2002.

SICILIANO, F.; JONAS, J. J. Mathematical modelling of the hot strip rolling of microalloyed Nb, multiply-alloyed Cr-Mo, and plain C-Mn steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 31, n. 2, p. 511-530, feb. 2000.

SILVÉRIO, A. S. **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 Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SKRYABIN, M. L.; LIKHANOV, V. A. The study of casting defects in steel 35HGSL. **Journal of Physics**, v. 1399, n. 44063, p. 1088-1094, may 2019.

TSELIKOV, A. I.; ZJUKIN, V. Modern rolling mills in the URSS. **Iron Book**, Moskow, v. 20, n. 3, p. 355-561, may 1978.

WICK, H. J. Estimate of ingot temperatures in a soaking pit using an extended Kalman filter. **IFAC Control Science and Technology**, Kyoto, v. 14, n. 2, p. 2569-2574, aug. 1981.

WU, X. L.; JIANG, P.; CHEN, L.; ZHANG, J. F.; YUAN, F. P.; ZHU, Y. T. Synergetic strengthening by gradient structure, **Materials Research Letter**, Nanjing, v. 2, n. 4, p. 185-191, jun. 2014.

WU, X.; JIANG, P.; CHEN, L.; YUAN, F.; ZHU, Y. T. Extraordinary strain hardening by gradient structure. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Beijing, v. 111, n. 20, p. 7197-7201, may 2014.

WU, X.; YANG, M.; YUAN, F.; WU, G.; WEI, Y.; HUANG, X.; ZHU, Y.
Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Beijing, v. 112, n. 47, p. 14501-14505, nov. 2015.

WU, X.; ZHU, Y. Heterogeneous materials: a new class of materials with unprecedented mechanical properties. **Materials Research Letter**, Nanjing, v. 5, n. 8, p. 527-532, jun. 2017.

YANG, M.; PAN, Y.; YUAN, F.; ZHU, Y.; WU, X. Back stress strengthening and strain hardening in gradient structure. **Materials Research Letter**, Shanghai, v. 4, n. 3, p. 145-151, mar. 2016.

YANUSHKEVICH, Z.; LUGOVSKAYA, A.; BELYAKOV, A.; KAIBYSHEV, R.
Deformation microstructures and tensile properties of an austenitic stainless steel subjected to multiple warm rolling. **Materials Science and Engineering**, Belgorod, v. 667, n. 14, p. 279-285, jun. 2016.