

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 31/07/2019.

**Guilherme Rosati Mecelis**

**Caracterização Mecânica e Microestrutural de Aços  
Microligados Processados Industrialmente**

Ilha Solteira

2017

**Guilherme Rosati Mecelis**

**Caracterização Mecânica e Microestrutural de Aços  
Microligados com Processamento Industrial**

**Orientador:** Prof. Dr. Juno Gallego

**Coorientador:** Prof. Dr. Cleiton Lazaro Fazolo de Assis

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira, como cumprimento de requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Ilha Solteira

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M486c Mecelis, Guilherme Rosati.  
Caracterização mecânica e microestrutural de aços microligados processados industrialmente / Guilherme Rosati Mecelis. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
51 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Caracterização Mecânica dos Materiais, 2017

Orientador: Juno Gallego  
Co-orientador: Cleiton Lazaro Fazolo De Assis  
Inclui bibliografia

1. Aços microligados. 2. Microestrutura. 3. Microdureza. 4. Processamento termomecânico.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Caracterização Mecânica e Microestrutural de Aços Microligados Processados Industrialmente

**AUTOR:** GUILHERME ROSATI MECELIS

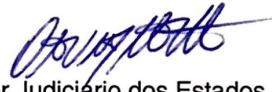
**ORIENTADOR:** JUNO GALLEGO

**COORIENTADOR:** CLEITON LAZARO FAZOLO DE ASSIS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JUNO GALLEGO  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. OTAVIO VILLAR DA SILVA NETO  
Profissional Liberal / Perito Judicial da Poder Judiciário dos Estados

Ilha Solteira, 31 de julho de 2017

## **DEDICO**

À minha mãe Daniela Rosati Nogueira e meu pai Daercy Teixeira Nogueira, que sempre foram exemplos para minha vida pessoal e profissional, que me apoiaram e incentivaram, possibilitando mais essa conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus,

pela força, conforto e amor incondicional.

Aos meus pais, familiares e amigos,

por todo apoio, compreensão, ajuda, conselhos e por todo carinho ao longo deste caminho.

Aos professores Dr. Cleiton Lázaro Fazolo de Assis e Dr. Juno Gallego,

por toda amizade, compreensão, apoio, auxílio, orientação e companheirismo na execução deste trabalho.

Aos grupos de pesquisa NUPEM, do IFSP de Votuporanga, e MAPROTEC, da UNESP de Ilha Solteira,

pelo apoio técnico e científico no desenvolvimento do trabalho.

Ao CNPQ, UNESP e IFSP,

pelo apoio financeiro para realização deste trabalho e participação em eventos.

“ Não existe triunfo sem perda, não há vitória sem sofrimento,  
não há liberdade sem sacrifício. ” J.R.R. Tolkien



## RESUMO

Os aços microligados são materiais já tradicionais e muito versáteis por suas propriedades mecânicas superiores, sendo sua evolução diretamente ligada com a otimização da composição química e do processamento termomecânico. É um tipo de aço que apresenta uma microestrutura refinada, alta resistência mecânica, boa usinabilidade e soldabilidade e tem substituído aços comuns por atingir essas propriedades mecânicas a partir de processos de fabricação mais baratos. Os aços estudados são comerciais, apresentam limite de escoamento entre 419 MPa e 646 MPa e grãos ferríticos finos com tamanhos inferiores a 3,70  $\mu\text{m}$ . Neste trabalho são investigadas chapas industriais produzidas por laminação controlada, visando analisar a correlação entre a microestrutura ferrítico-perlítica e as propriedades mecânicas encontradas nas diferentes secções longitudinal, transversal e normal da chapa laminada. As diferenças entre as diferentes secções não são bem exploradas atualmente, então este estudo contribui para uma melhor compreensão da anisotropia introduzida pelo processamento termomecânico industrial. Foram feitas correlações entre as propriedades, confirmando a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as secções, constatando que esses aços podem apresentar variações em suas propriedades de acordo com a secção de análise adotada. Foi confirmada a correlação de Hall-Petch nos aços estudados, e a influência dos mecanismos de endurecimento foi avaliada para estes materiais.

**Palavras-Chaves:** Aço microligado. Grãos ferríticos. Microestrutura. Microdureza. Processamento termomecânico.

## ABSTRACT

Microalloyed steels are traditional materials and very versatile due to their superior mechanical properties, being its evolution directly linked with an optimization of the chemical composition and the thermomechanical processing. It is a type of steel that has a fine microstructure, high mechanical strength, good machinability and weldability, and has substituted common steels for achieving these mechanical properties with a cheaper manufacturing process. The studied steels are commercial and have yield strength between 419 MPa and 646 MPa and fine ferritic grains with size smaller than 3.70  $\mu\text{m}$ . In this work are investigated industrial plates produced by controlled lamination, aiming to analyze the correlations between ferrite-perlitic microstructure and the mechanical properties found in the different sections of the hot rolled plate (longitudinal, transverse and normal). The differences between the different sections are not well explored, so this study contributes to a better understanding of the anisotropy introduced by industrial thermomechanical processing. Correlations were made between the properties, confirming the existence of significant differences between the different sections, finding that these steels may show different properties according to the section of analysis adopted. The Hall-Petch correlation was confirmed in the studied steels, and the influence of the hardening mechanisms was also evaluated.

**Key words:** Microalloyed steel. Ferritic grain. Microstructure. Microhardness. Thermomechanical processing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Desenvolvimento de aços em tubulações como exemplo de pesquisas com aços ARBL (PTMC: Processo Termomecânico Controlado; RA: Resfriamento Acelerado; TD: Têmpera Direta).....	14
Figura 2	- Estágios da laminação controlada.....	16
Figura 3	- Precipitação interfásica em aço microligado com vanádio.....	18
Figura 4	- Dependência do tamanho do precipitado (X) e sua fração no endurecimento por precipitação no segundo modelo de Ashby-Orowan, comparado com experimentos para algumas adições de microligantes.....	21
Figura 5	- Secções da chapa laminada adotadas para o estudo, sendo: L-Longitudinal, N-Normal e T-Transversal.....	24
Figura 6	- Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	25
Figura 7	- Amostras de cada uma das 3 secções ao final da preparação.....	26
Figura 8	- Passos de preparação e análise das imagens. (a) Imagem original; (b) Imagem com contornos reforçados; (c) Resultado de mapa de áreas no ImageJ.....	27
Figura 9	- Exemplos de grãos ferríticos e suas respectivas circularidades.....	28
Figura 10	- Ultra microdurômetro (DUH).....	29
Figura 11	- Ilustração do porta amostra do ultra microdurômetro.....	30
Figura 12	- Micrografias obtidas no MEV.....	32
Figura 13	- Distribuição de frequência dos tamanhos de grão nos aços microligados.....	34
Figura 14	- Histograma representando a porcentagem de grão em faixas de tamanho.....	35
Figura 15	- Representação da relação de Hall-Petch para diversos materiais em comparação com os estudados.....	37
Figura 16	- Distribuição de frequência das circularidades nos aços microligados.....	39
Figura 17	- Gráfico das parcelas de limite de escoamento calculado e estimado por precipitação.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Elementos de liga utilizados nos aços.....	15
Tabela 2	- Composição dos aços utilizados (%p).....	23
Tabela 3	- Tamanhos de grão medidos e limite de escoamento.....	33
Tabela 4	- Análise anova para os tamanhos de grão nos aços em relação à secção.....	35
Tabela 5	- Comparações de diferença estatística do tamanho de grão entre as secções estudadas em cada aço e global.....	36
Tabela 6	- Dados extraídos de fontes externas para comparação.....	37
Tabela 7	- Comparações de diferença estatística do tamanho de grão entre os aços estudados.....	38
Tabela 8	- Circularidade dos grãos nos aços avaliados.....	39
Tabela 9	- Análise anova para a circularidade nos aços em relação à secção.....	40
Tabela 10	- Comparações de diferença estatística da circularidade de grão entre as secções estudadas em cada aço e global.....	40
Tabela 11	- Comparações de diferença estatística da circularidade de grão entre os aços estudados.....	41
Tabela 12	- Microdureza nos aços avaliados.....	42
Tabela 13	- Análise anova para a microdureza nos aços em relação à secção.....	42
Tabela 14	- Comparações de diferença estatística da microdureza entre as secções estudadas em cada aço e global.....	42
Tabela 15	- Comparações de diferença estatística da microdureza entre os aços estudados.....	43
Tabela 16	- Influência do material e secção nas propriedades analisadas.....	44
Tabela 17	- Limites de escoamento calculado por Pickering, total do fabricante, e estimado por precipitação + discordâncias.....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\%p$  - Porcentagem em peso
- $\sigma_y$  - Limite de escoamento
- $\sigma_o$  - Resistência intrínseca do ferro na ferrita
- $k_y$  - Coeficiente de resistência de contorno de grão
- $d$  - Tamanho de grão (diâmetro equivalente)
- $\Delta\sigma_{SS}$  - Aumento de resistência por solução sólida
- $\Delta\sigma_{GS}$  - Aumento de resistência por tamanho de grão
- $\Delta\sigma_{dis}$  - Aumento de resistência por discordâncias
- $\Delta\sigma_{ppt}$  - Aumento de resistência por precipitação

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	10
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	11
2.1	HISTÓRICO DOS AÇOS MICROLIGADOS.....	11
2.2	AÇOS MICROLIGADOS.....	14
2.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PRECIPITAÇÃO NOS AÇOS MICROLIGADOS..	16
2.4	MECANISMOS DE ENDURECIMENTO NOS AÇOS MICROLIGADOS.....	19
2.5	MODELOS DOS MECANISMOS DE ENDURECIMENTO.....	22
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	23
3.1	CORPOS DE PROVA.....	23
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	24
3.3	CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA.....	25
3.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	29
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	31
4.1	TAMANHO DE GRÃO.....	31
4.2	CIRCULARIDADE.....	38
4.3	MICRODUREZA.....	41
4.4	INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS.....	43
4.5	MECANISMOS DE ENDURECIMENTO.....	44
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	46
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	47

## 1 INTRODUÇÃO

O primeiro aço industrial com características de microligado foi lançado no mercado em 1958, pela *National Steel Corporation* dos Estados Unidos, mas o termo microligado tem sua menção relacionada à publicação de Beiser (1959).

Os aços microligados são materiais muito utilizados atualmente e uma simples busca no *google academics*, que retorna mais de dez mil artigos nos últimos cinco anos, mostra que são muito estudados. Dentre suas aplicações mais gerais podem ser listadas as indústrias automotivas (BHATTACHARYA, 2014), tubulações em oleodutos (MORALES, 2013), chapas (GORNI, 2015) e na construção de pontes (SHIM, 2011), mostrando que esse material vem ganhando espaço no mercado gradualmente.

Estudos como o de Show (2010) mostram que os aços microligados vem sendo utilizados para diminuir custos de produção, devido à sua microestrutura mais refinada e resistência superior comparado aos aços convencionais, possibilitando que etapas da produção sejam encurtadas ou eliminadas chegando a um produto final com resistência igual ou superior à adquirida com aços convencionais em processos mais complexos.

De forma geral, esses estudos abordam as características dos aços microligados como um material homogêneo, mas há também trabalhos como os de Ebrahimi (2008) que estudam a anisotropia nesses aços. Embora em menor quantidade, trabalhos desse tipo abordam as propriedades dos aços microligados considerando diferentes secções de análise.

Este trabalho tem por objetivo investigar as propriedades mecânicas e microestruturais de aços microligados comerciais, considerando a direção de laminação de diferentes secções, possibilitando uma avaliação dos diversos aspectos associados a esse tipo de material.

Essa avaliação é importante pois evidencia as diferenças entre as secções e comprova a influência da escolha da secção de corte do material no estudo dos aços microligados. Características como a relação de Hall-Petch, os mecanismos de endurecimento e a morfologia dos grãos ferríticos existente nos materiais foram realizados neste estudo, permitindo correlacionar as características das secções, a fim de caracterizar o nível de anisotropia existente nas diferentes secções analisadas das chapas laminadas.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho investigou as propriedades mecânicas e microestruturais de aços microligados comerciais, correlacionando-as de acordo com diferentes secções de análise, chega-se à conclusão que os aços estudados apresentam uma boa correlação com o princípio estabelecido por Hall-Petch, relacionando seu refino de grão com o aumento de resistência. Foi observado ainda que aços com mesma composição química podem apresentar, além de propriedades mecânicas diferentes, configurações distintas em sua microestrutura ao variar seu método de fabricação.

Constatou-se que a escolha da secção em relação à direção de laminação é importante para a obtenção dos resultados para estudo, uma vez que esta influencia diretamente os resultados; e que a resistência dos aços é influenciada em parte por sua composição, mas a parcela que cabe ao endurecimento por discordâncias tem relação com o processo de fabricação utilizado.

Para aprofundamento neste assunto, novas análises, como a investigação de cada mecanismo de endurecimento e a utilização de mais aços, se fazem necessárias e podem ser desenvolvidas em futuros trabalhos a fim de explorar a fundo o comportamento das diferentes secções de análise e a influência que têm nos resultados.



## REFERÊNCIAS

- ARIAS-CASTRO, E. ; CANDÈS, E. J.; PLAN, Y. Global testing under sparse alternatives: ANOVA, multiple comparisons and the higher criticism. **The Annals of Statistics**, Shaker Heights, v. 39., n. 5, p. 2533-2556, 2011.
- DAVIS, J. R. (Ed.). **Alloying: understanding the basics**. Kinsman Road: ASM International, 2001. p. 647.
- BAKER, T. N. Microalloyed steels. In: CHARLES, J. A. et al. **Future developments of metals and ceramics**. London: Institute of Materials, 1992. p. 75-119.
- BAKER, T. N. Microalloyed steels. **Ironmaking & Steelmaking**, Oxfordshire, v. 43, n. 4, p. 264-307, 2016.
- BECKET, F. M. Some effects of zirconium in steel. **Transactions of the American Electrochemical Society**, Pennington, v. 43, p. 261-269, 1923.
- BEISER, C. A. The effect of small columbium additions to semi killed, medium carbon steels. **ASM**, Eschwege, n. 138, 1959. Preprint.
- BHADESHIA, H. K. D. H. **Bainite in steels**. London: The Institute of Materials, 1992. p. 454.
- BHATTACHARYA, D. Microalloyed steels for the automotive industry. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 371, 2014.
- BREEN, A. J. et al. Resolving the morphology of niobium carbonitride nano-precipitates in steel using atom probe tomography. **Microscopy and Microanalysis**, Cambridge, v. 20, n. 4, p. 1100-1110, 2014.
- BUSBY, J. T.; HASH, M. C.; WAS, G. S. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels. **Journal of Nuclear Materials**, Amsterdam, v. 336, n. 2, p. 267-278, 2005.
- CAMPOS, S. S.; KESTENBACH, H. J.; MORALES, E. V. On strengthening mechanisms in commercial Nb-Ti hot strip steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, New York, v. 32, n. 5, p. 1245-1248, 2001.
- CHARLEUX, M. et al. Precipitation behavior and its effect on strengthening of an HSLA-Nb/Ti steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, New York, v. 32, n. 7, p. 1635-1647, 2001.
- COTTRELL, Alan Howard; DEXTER, D. L. Dislocations and plastic flow in crystals. **American Journal of Physics**, Melville, v. 22, n. 4, p. 242-243, 1954.

DEARDO, A. J. Metallurgical basis for thermomechanical processing of microalloyed steels. **Ironmaking & Steelmaking**, Oxfordshire, v. 28, n. 2, p. 138-144, 2001.

DEARDO, A. J. et al. On strength of microalloyed steels: an interpretive review. **Materials Science and Technology**, Oxfordshire, v. 25, n. 9, p. 1074-1082, 2009.

DEGARMO, E. P. et al. **Materials and process in manufacturing**. New Jersey: Prentice Hall, 1997. p. 1259.

DUNNE, D. P. Interaction of precipitation with recrystallisation and phase transformation in low alloy steels. **Materials Science and Technology**, Oxfordshire, v. 26, n. 4, p. 410-420, 2010.

EBRAHIMI, A. R.; ABYAZI, A.; ABBASI, S. M. Anisotropy in microalloyed S355N steel. **International Journal of Iron & Steel Society**, Amsterdam, v. 5, n. 2, p. 14-20, 2008.

EDMONDS, D. V.; HONEYCOMBE, R. W. Precipitation in iron-based alloys. In: RUSSELL, K. C.; AARONSON, H. I. **Precipitation processes in solids**. Warrendale: Metallurgical Society-AIME, 1978. p. 121-160.

FEILD, A. L. Some effects of zirconium in steel. **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, Richardson, v. 69, p. 848-894, 1923.

FEILD, A. L. Effect of zirconium on hot-rolling properties of high-sulfur steels and the occurrence of zirconium sulfide. **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, Richardson, v. 70, p. 201-223, 1924.

GALLEGO, J. et al. Efeitos da composição química e da temperatura de transformação sobre o endurecimento por precipitação interfásica em aços microligados. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 50, 2005.

GLADMAN, T. The physical metallurgy of microalloyed steels. **Materials Science and Technology**, Oxfordshire, v. 15, n. 1, p. 30-36, 1999.

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

HALFA, H. Recent trends in producing ultrafine grained steels. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, Irvine, v. 2, n. 5, p. 428, 2014.

HALL, E. O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. **Proceedings of the Physical Society. Section B**, Bristol, v. 64, n. 9, p. 747, 1951.

HIRSCH, P. B. Direct observations of moving dislocations: reflections on the thirtieth anniversary of the first recorded observations of moving dislocations by transmission electron microscopy. **Materials Science and Engineering**, Amsterdam, v. 84, p. 1-10, 1986.

HIRSCH, P. B. et al. **Electron microscopy of thin crystals**. Londres: Butterworth, 1966. p. 549.

HOUGHTON, D. C.; WEATHERLY, G. C.; EMBURY, J. D. Characterization of carbonitrides in Ti bearing HSLA steels. In: DEARDO, A. J. et al. **Thermomechanical processing of microalloyed austenite**. Warrendale: Metallurgical Society of AIME, 1982. p. 267-292.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 14577-1**. metallic materials: instrumented indentation test for hardness and materials parameters — part 1: test method. Switzerland, 2002.

JOLLEY, W. A note on precipitate formation in quench-aged  $\alpha$ -iron. **Philosophical Magazine**, Oxfordshire, v. 16, n. 141, p. 637-642, 1967.

KELLY, A. **Strengthening methods in crystals**. Michigan University: Halstead Press Division, Wiley, 1971. p.672.

LAGNEBORG, Rune et al. The role of vanadium in microalloyed steels. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, Weinheim, v. 28, n. 5, p. 186-241, 1999.

MAO, Xet al. Strengthening mechanisms of a new 700MPa hot rolled ti-microalloyed steel produced by compact strip production. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 210, n. 12, p. 1660-1666, 2010.

MARTINS, V. L. V.; VASCONCELOS, F. P.; GALLEGO, J. Correlação limite de escoamento: microestrutura em aço microligado nb-ti-v. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA MATERIAIS E MINERAÇÃO- ABM, 68., 2013, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2013. p. 3496 – 3506.

MISRA, R. D. K. et al. Microstructural evolution in a new 770MPa hot rolled Nb–Ti microalloyed steel. **Materials Science and Engineering: A**, Bethesda, v. 394, n. 1, p. 339-352, 2005.

MORALES, E. V. et al. Strengthening mechanisms in a pipeline microalloyed steel with a complex microstructure. **Materials Science and Engineering: A**, Bethesda, v. 585, p. 253-260, 2013.

MORRISON, W. B. Microalloy steels—the beginning. **Materials Science and Technology**, Oxfordshire, v. 25, n. 9, p. 1066-1073, 2009.

MORRISON, W. B.; WOODHEAD, J. H. Influence of small niobium additions on mechanical properties of commercial mild steels. **Journal of the Iron and Steel Institute**, Chuo-ku, v. 201, n. 1, p. 43-46, 1963.

PAVLINA, E. J.; VAN TYNE, C. J. Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, New York, v. 17, n. 6, p. 888-893, 2008.

PETCH, N. J. The cleavage strength of polycrystals. **Journal of the Iron and Steel Institute**, Chuo-ku, v. 174, p. 25-28, 1953.

PICKERING, F. B. **Physical metallurgy and the design of steels**. London: Applied Science Publishers, 1978. p. 275.

RANDLE, V. **Microtexture determination and its applications**. 2nd ed. London: The Institute of Materials, 2008. p. 174.

SCHINDELIN, J.; RUEDEN, C. T.; HINER, M. C.; & ELICEIRI, K. W. The imagej ecosystem: an open platform for biomedical image analysis. **Molecular Reproduction and Development**, Hoboken, v. 82, n. 7-8, p. 518-29, 2015.

SELLARS, C. M. The physical metallurgy of hot rolling. In: SELLARS, C. M.; DAVIES, G. J. **Hot working and forming processes**. London: Institute of Materials, 1990. p. 3-15.

SHIM, Chang-Su et al. Design of double composite bridges using high strength steel. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 14, p. 1825-1829, 2011.

SHOW, B. K. et al. Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a microalloyed HSLA steel. **Materials Science and Engineering: A**, Bethesda, v. 527, n. 6, p. 1595-1604, 2010.

SONG, R. et al. Microstructure and crystallographic texture of an ultrafine grained C–Mn steel and their evolution during warm deformation and annealing. **Acta Materialia**, Kidlington, v. 53, n. 3, p. 845-858, 2005.

TAKAHASHI, M.; BHADESHIA, H. K. D. H. Model for transition from upper to lower bainite. **Materials Science and Technology**, Oxfordshire, v. 6, n. 7, p. 592-603, 1990.

TAMURA, I. ; SEKINE, H. ; TANAKA, T. **Thermomechanical processing of high-strength low-alloy steels**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. p. 256.

VERVYNCKT, S. et al. Modern HSLA steels and role of non-recrystallisation temperature. **International Materials Reviews**, Oxfordshire, v. 57, n. 4, p. 187-207, 2012.

WANG, J.; VAN DER ZWAAG, S. Stabilization mechanisms of retained austenite in transformation-induced plasticity steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Warrendale, v. 32, n. 6, p. 1527-1539, 2001.

WEBSTER, D. **Effect of precipitates in grain refining microalloyed steels**. Sheffield: BISRA, 1962. (BISRA Report, MGC/18/62).

ZAJAC, S. et al. **Quantitative structure-property relationships for complex bainitic microstructure**. Luxembourg: Research Fund for Coal and Steel Final Report, European Commission, p. 1-157, 2003.

ZHANG, P.; LI, S. X.; ZHANG, Z. F. General relationship between strength and hardness. **Materials Science and Engineering: A**, Bethesda, v. 529, n. 1, p. 62-73, 2011.