DANIEL BOJIKIAN MATSUBARA

**Caracterização de chapa grossa de aço microligado temperado por
meio da técnica de dilatométrica**

São Paulo
2014

DANIEL BOJIKIAN MATSUBARA

**Caracterização de chapa grossa de aço microligado temperado por
meio da técnica de dilatométrica**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

São Paulo
2014

DANIEL BOJIKIAN MATSUBARA

**Caracterização de chapa grossa de aço microligado temperado por
meio da técnica de dilatometria**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 10 de dezembro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Ficha Catalográfica

Matsubara, Daniel Bojikian

Caracterização de chapa grossa de aço microligado temperado por meio da técnica de dilatométrica / D.B. Matsubara. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.

96 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Chapas 2.Aço 3.Caracterização por dilatométrica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

À minha esposa Tassiane dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos aqueles que possibilitaram a realização deste trabalho.

Em especial ao Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin por me aceitar como aluno de mestrado, por todas as orientações e principalmente pela paciência.

Aos membros da banca Prof. Dr. Hélio Goldenstein e Dr. Antonio Augusto Gorni pelas sugestões e pelo incentivo.

Ao Prof. Dr. Nelson Batista de Lima pela contribuição nos ensaios de difração de raios-x.

Aos colegas da PMT Mário González Ramirez, Edwan Anderson Ariza Echeverri, Arthur Seiji Nishikawa e Paulo Henrique Ogata pela contribuição e auxílio nas diversas etapas deste trabalho.

À Suellen e Vera da secretaria da PMT por me ajudarem com todas as questões referentes à pós-graduação e possibilitarem toda a regularização do mestrado.

À Universidade de São Paulo e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela oportunidade de aprimoramento pessoal e por fornecer todos os recursos necessários para a realização de toda parte experimental do trabalho.

Aos colegas da Usiminas por cederem o material utilizado e todos os seus parâmetros de produção.

Aos meus pais pelo apoio e sacrifício incondicional em todas as etapas da minha vida.

À minha esposa Tassiane, meu norte quando estive perdido, minha muleta quando estive fraco. Minha maior incentivadora, motivadora e torcedora.

A Deus por me dar forças quando as minhas estavam esgotadas.

RESUMO

Foram coletadas amostras de uma chapa grossa temperada, de aço microligado ao boro com 8 mm de espessura. O aço foi produzido em aciaria do tipo LD, laminado na forma de chapa grossa em laminador de cadeira única reversível e finalmente recebeu tratamento de têmpera em forno de tubos radiantes e máquina de têmpera com fluxo de água. Todas as etapas de produção tiveram os parâmetros de processo controlados para obtenção das melhores propriedades possíveis. As amostras foram retiradas da região situada a um quarto da largura da chapa e submetidas a diversos ciclos térmicos em aparelho de dilatométrica. Com auxílio de técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e medidas de dureza, o aço pôde ser caracterizado e foi possível levantar as curvas de resfriamento contínuo (TRC). Para ajudar na interpretação das microestruturas, 3 corpos de prova adicionais foram submetidos a ciclos isotérmicos para se conhecer a morfologia dos microconstituintes aciculares. As microestruturas revelaram a presença de múltiplos microconstituintes, principalmente em resfriamentos a partir de resfriamentos 25°C/s, quando surgem elementos aciculares como ferrita acicular e bainita misturados com ferrita poligonal e perlita. Acima desta taxa de resfriamento o campo perlítico é suprimido e a partir de 45°C/s surge a martensita. A 100°C/s a microestrutura é dominada predominantemente por martensita. As amostras resfriadas nas 3 taxas mais severas também revelaram a presença de austenita retida e constituinte MA, detectados por meio de difração de raios-x.

Palavras-chave: Aço temperado. Caracterização. Dilatometria. Curva TRC.

ABSTRACT

Samples were taken from a quenched plate with 8mm thickness and chemical composition consisting of carbon, manganese, silicon, aluminum, niobium, titanium and boron. The steel was produced in LD converter, rolled in a reversible single chair rolling mill and quenched in a radiating tube furnace and quenching machine with water flow. All production stages had the process parameters controlled to obtain the best possible properties. The samples were extracted from a position situated at one quarter of the plate's width and submitted to various thermal cycles in dilatometry device. With the aid of optical microscopy, scanning electron microscopy and hardness measurements, the steel could be characterized and the continuous cooling transformation curves could (CCT) be plotted. To help on the interpretation of the microstructures, 3 additional samples were submitted to isothermal cycles in order to achieve the acicular microconstituents for comparison. The microstructures revealed the presence of multiple components, especially when cooling rates reach 25°C/s, where acicular elements, like acicular ferrite and bainite, are found along with polygonal ferrite and pearlite. Above this cooling rate the pearlite field is suppressed and starting at 45°C/s martensite was found. At 100°C/s the microstructure is mainly martensitic. The samples cooled at the 3 most severe rates also revealed the presence of retained austenite and MA constituent, which were detected by x-ray diffraction.

Key-words: Quenched steel. Characterization. Dilatometry. CCT curve.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1 Aços microligados	10
2.2 Aços com ferrita acicular	12
2.3 Controle de inclusões não metálicas	13
2.4 Tratamento de têmpera	14
2.5 Nova família de aços temperados	16
2.6 Dilatometria	17
2.6.1 Dilatômetro	19
2.6.2 Variáveis experimentais	21
2.6.3 Determinação das temperaturas de transformação	22
2.6.4 Determinação quantitativa das fases	24
2.6.5 Curvas TRC	26
2.7 Microconstituintes	27
2.8 Equação de Andrews	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Material analisado	35
3.2 Corpos de prova do material analisado	36
3.3 Métodos	37
3.3.1 Análise por dilatometria	37
3.3.2 Embutimento das amostras	40
3.3.3 Lixamento	40
3.3.4 Polimento	41
3.3.5 Ataque	41
3.3.6 Microscopia ótica	42
3.3.7 Dureza Vickers	43
3.3.8 Microscopia eletrônica de varredura	44
3.3.9 Difração de raios-x	45
4 RESULTADOS	46
4.1 Ciclos térmicos	46
4.2 Medidas de dureza	47

4.3 Resultados da dilatometria de têmpera	49
4.4 Microestrutura	61
4.4.1 Tratamentos isotérmicos	61
4.4.2 Microestruturas obtidas em resfriamento contínuo	64
4.5 Determinação de austenita retida	75
4.6 Curvas TRC	78
5 DISCUSSÃO	80
5.1 Resultados da dilatometria	80
5.2 Curva TRC	82
5.3 Avaliação da austenita retida e constituinte MA	87
6 CONCLUSÕES	89
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92