

Caracterização das Microestruturas Obtidas por Meio de Ensaio Jominy Monitorado do Aço SAE 1026

Characterization of the Microstructures Obtained by Means of Monitored Jominy Test of the Steel SAE 1026

Márcio Teodoro Fernandes¹

Ivaldo Ferreira Leão²

Paulo André Dias Jácome³

Leonardo Martins da Silva⁴

Paula Cristina Petriz Monteiro⁴

Palavras-chave

Ensaio Jominy

SAE 1026

Caracterização
Microestrutural

Aço hipoeutetóide

Resumo

O aumento da demanda mundial de aço e a redução da disponibilidade dos recursos naturais têm sido responsáveis pela formação de um panorama de desenvolvimento desafiador para a engenharia metalúrgica nos últimos anos, encarregando-a de equacionar o problema da obtenção de materiais em quantidade, qualidade, em ciclos de produção mais curtos, sem agredir o meio ambiente e a custos mais baixos para garantir a competitividade. Em países em desenvolvimento, aços hipoeutetóides são largamente utilizados na construção civil. O conhecimento dos mecanismos de obtenção desses aços, que não possuem em sua composição teores de elemento de liga significativos, podem permitir a elevação de suas propriedades superficiais, a partir de tratamentos térmicos, durante o processo de obtenção do produto final. Para o domínio da tecnologia envolvida, exige-se um profundo conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante o processamento desses aços. Com o objetivo de contribuir com o estudo desses fenômenos, este trabalho consistiu em caracterizar as microestruturas resultantes no aço hipoeutetóide SAE 1026, em função de diferentes taxas de resfriamento. Com o objetivo de se obter diferentes taxas de resfriamento ao longo do corpo de prova, foi projetado um equipamento para execução do ensaio Jominy (ASTM A-255, 1999), com características específicas para atender o monitoramento de temperatura. Após o resfriamento, o corpo de prova foi submetido a ensaios de dureza e metalográficos para caracterização das microestruturas obtidas e da variação das propriedades mecânicas para diversas taxas de resfriamento.

ISSN
1809-9475

Artigo
Original

Original
Paper

Recebido em
04/2014

Aprovado em
04/2014

Cadernos UniFOA

Edição n° 24 - Abril/2014

¹ Engenheiro Metalúrgico, Mestrando Universidade Federal Fluminense - PPGEM.

² Doutor Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense - EEMVR UFF.

³ Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA.

⁴ Universidade Federal Fluminense.

Abstract

The increase in world steel demand and reduced availability of natural resources have been responsible for the formation of a challenging scenery of development for metallurgical engineering in recent years, charging it to equate the problem of obtaining materials in quantity, quality, in shorter production cycles, without harming the environment and offering lower costs to ensure competitiveness. In developing countries, hypoeutectoid steels are widely used in construction. Knowledge of the mechanisms of obtaining these steels, that do not have in their composition significant levels of alloying element, may allow elevation of its surface properties from heat treatment during the process of obtaining the final product. For the field of technology involved, it requires a deep understanding of the phenomena that occur during the processing of these steels. Aiming to contribute for the study of these phenomena, this work consisted to characterize the resulting microstructure in hypoeutectoid steel SAE 1026 for different cooling rates. Aiming to obtain different cooling rates along the specimen, an equipment was designed to run the Jominy test (ASTM A-255, 1999), with specific features to meet the temperature monitoring. After cooling, the specimen was submitted to hardness and metallographic tests for characterization of the microstructures obtained and the variation of mechanical properties for various cooling rates.

Keywords

Jominy Test

SAE 1026

Microstructural
Characterization

Hypoeutectoid steels

1. Introdução

Nas últimas décadas, a produção de aços atingiu valores superiores a 1000 Mt/ano. *Ao mesmo tempo, a competitividade cresce no mesmo ritmo que a busca por essa produtividade.* Concomitantemente, o nível de qualidade do processo de fabricação desses aços se desenvolveu consideravelmente. Há o controle de diversos elementos presentes no aço, em níveis de partes por milhão (ppm), o controle e a engenharia das inclusões não metálicas presentes em frações volumétricas inferiores a 10^{-4} são acompanhados por projetos micro estruturais sofisticados, em que a composição química e o processamento termomecânico são otimizados, buscando propriedades e desempenho superiores. Grande parte desse desenvolvimento deve-se a melhor compreensão dos fenômenos envolvidos e a evolução associada à capacidade de modelar esses fenômenos e os processos (COSTA E SILVA, 2009).

Aços hipoeutetóides são projetados para oferecer melhores propriedades superficiais quando aliados a processos de resfriamentos controlados. Eles não são considerados aços no sentido convencional, pois são projetados para atender propriedades mecânicas superficiais específicas sem adição de elementos de liga, sendo normalmente obtidos como barras

laminadas a quente. Algumas das principais aplicações do aço hipoeutetóide é na fabricação de vergalhões, barras e perfis que têm como característica o aumento da dureza superficial através de tratamento térmico, o que possibilita a sua aplicação em obras de construção civil.

Após a solidificação no lingotamento contínuo, as barras são obtidas e resfriam naturalmente, aguardando a entrada na planta de laminação a quente, na qual serão enforçadas e mantidas a uma temperatura de 1100°C, para uma completa austenitização (METALS HANDBOOK, 1991).

Conhecendo-se as características da austenita formada durante o aquecimento, as cargas de laminação e as taxas de resfriamento, torna-se possível o mapeamento da morfologia e as frações volumétricas dos microconstituintes resultantes, conseqüentemente, as propriedades mecânicas.

Objetiva-se com este trabalho a caracterização dos diversos perfis de temperaturas obtidas durante o Ensaio Jominy (ASTM A-255,1999) e o comportamento das taxas de resfriamentos em função da dureza e das frações volumétricas dos microconstituintes obtido com o afastamento da base do corpo de prova do ensaio (nas posições de 5, 10, 15, 20, 30 e 50mm).

2. Materiais e Métodos

A definição do aço utilizado, especificação do equipamento para ensaio e a metodologia para coleta e análise dos dados de temperatura são descritas neste item com objetivo de garantir a caracterização dos microconstituintes obtidos com a variação das taxas de resfriamento.

2.1. Aço Utilizado

O aço empregado nos experimentos foi um aço carbono não ligado hipoeutetóide. Os microconstituintes esperados, com a variação das taxas de resfriamento, são ferrita, perlita e bainita. O material foi obtido em forma de barra de 2" (polegadas) e apresentou, em sua composição, 0,2660% de carbono, 0,7760% de manganês, 0,1920% de silício e elementos residuais que o caracterizou como SAE 1026.

2.2. Equipamento para Ensaio Jominy Monitorado

Foi construído um equipamento de ensaio Jominy com determinadas características para garantir a aplicação da ASTM A-255,1999, conforme temas desenvolvidos por diversos autores, entre eles Xavier, em 2009, porém com o diferencial de atender o monitoramento da temperatura por termopares durante o resfriamento, conforme se pode observar nos detalhes do projeto (figura 1): uma entrada frontal para suporte e posicionamento dos termopares, entrada frontal no suporte de resfriamento e pino estabilizador do corpo de prova.

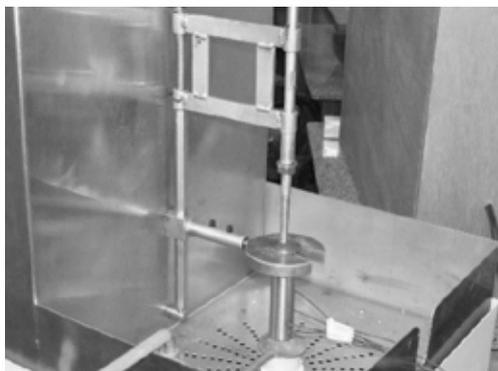


Figura 1- Equipamento de Ensaio Jominy Monitorado

2.3. Posicionamento dos Termopares

Foram confeccionados corpos de prova, conforme ASTM A-255 (1999) e furos foram posicionados a partir da base (onde recebe o jato de água para resfriamento) em 5, 10, 15, 20, 30 e 50 mm, de forma obter-se um maior número de taxas em um único ensaio.

Bortoleto (2010) utilizou Ensaio Jominy, monitorando com termopares do tipo "k" de 1 mm de diâmetro e o corpo de prova de aço SAE 4140 em três posições: no topo, meio e base, onde, para obtenção de várias taxas de resfriamento, variou-se a vazão de água do ensaio. Oliveira et al. (2010) monitorou o resfriamento de um cilindro de aço SAE 4140 de 50,8 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento nas posições central e a 1 mm da superfície, onde a obtenção das taxas foram por resfriamento ao ar e por imersão em água.

2.4. Aquecimento e Monitoramento

O corpo de prova foi enfiado a uma temperatura de 950 °C e após 30 minutos atingiu a temperatura de austenitização. Após a equalização da temperatura, o corpo de prova encharcou por 45 minutos, à temperatura de 950 °C e foi desenfiado e submetido ao resfriamento no equipamento de Ensaio Jominy Monitorado. As temperaturas foram medidas em função do tempo, com termopares do tipo K que enviaram para um registrador digital de dados modelo ALMENO 2890-9 da Ahlborn, a uma frequência de 1 Hz. Os dados foram enviados ao software/interface gráfica, AMR WinControl, que permite a observação do ensaio.

2.5. Medição de Dureza

O corpo de prova foi usinado e rebaixado em 0,9 mm na direção radial em 4 pontos diferentes, para cada posição de termopar, com objetivo de se obter oito pontos de dureza por termopar. Foi utilizada a escala Vickers para obtenção, onde se obteve a média e o desvio padrão. A carga utilizada foi 294 N (30 Kp), com um tempo de 20 s de aplicação, conforme norma NBR 6672.

2.6. Preparação das Amostras

A preparação das amostras, os ataques para análises metalográficas (DEL SANT, 2010) e a estimativa das fases transformadas por análise de imagem foram as etapas que compuseram esse tópico. Para análise metalográfica, fez-se necessário o corte do corpo de prova em planos radiais centralizados no meio dos furos, que previamente alojaram os termopares. Após o seccionamento do corpo de prova, foram obtidas 6 (seis) amostras. Para facilitar o manuseio, foram levadas ao embutimento a quente (baquelite), com pressão de 12 KN por um período de 7 minutos. Para lixamento da amostra, foram utilizadas lixas de carvão de silício (SiC) para preparação inicial da superfície em sequências #100, #320, #500, #800 e #1200, em lixadeiras semiautomáticas por via úmida. Foi adotado o procedimento de lavar a amostra em água corrente e girá-la em 90° a cada troca de granulometria de lixa.

Politrizes rotativas semiautomáticas foram utilizadas para polimento através de pano de feltro e abrasivo polidor de alumina (Al_2O_3), em granulometrias de 1,0, 0,5 e 0,3 μm . As amostras foram polidas em movimentos circulares contrários à direção de rotação do pano, em ordem decrescente de granulometria, sendo lavadas a cada mudança de granulometria.

2.7. Caracterização Microestrutural

O primeiro ataque foi com o reagente Nital, composição corresponde a 3% ácido nítrico (HNO_3) e 97% de álcool etílico. O ataque foi feito por imersão, utilizando-se um recipiente chamado vidro de relógio. A imersão para revelação foi o tempo suficiente para o desaparecimento do aspecto brilhante.

O segundo ataque foi o Le Pera, que é composto por duas soluções em partes iguais: Metabissulfito de Sódio, concentração de 1% diluído em água e ácido pícrico, em concentração de 4% diluído em etanol, aplicados em aços multifásicos de alta resistência. Esse ataque tem por finalidade revelar a ferrita com tonalidade castanho-amarelada, bainita preta ou marrom escura e martensita com a austenita retida, na cor branca.

Após o ataque com o reagente Le Pera, as amostras que revelaram bainita foram novamente atacadas com Nital, polidas e submetidas ao Microscópio Eletrônico de Varredura para a caracterização desse microconstituente, através da técnica de análise por espalhamento de elétrons secundários.

2.8. Cálculo da Fração do Microconstituente

No cálculo da fração volumétrica a metodologia utilizada foi a fotomicrografia, através de câmera digital Cybernet para captação das imagens, e processadas no programa de análise de imagem denominado de Image Pro-Plus.

Após ataque de Nital, foram retidas 10 fotos para cada amostra e calculadas as frações volumétricas da ferrita (parte clara) e a fração total do conjunto perlita, martensita e bainita (prováveis microconstituintes, parte escura).

Após ataque Le Pera, foram retiradas 10 fotos para cada amostra e calculada a fração volumétrica do microconstituente bainita.

Com os resultados, foram calculadas as médias, desvio padrão e o erro padrão para cada posição monitorada.

3. Resultados e Discussões

A metodologia utilizada permitiu obter os resultados que, discutidos nesse tópico, simulam o comportamento do aço SAE 1026, quando submetido a uma variação de taxas de resfriamento.

3.1. Ensaio Jominy Monitorado

O monitoramento do perfil térmico no Ensaio Jominy foi realizado através de instalação de termopares nas posições de 5, 10, 15, 20, 30 e 50 mm, com relação à base do corpo de prova, o que permitiu obter a distribuição de temperatura, com diferentes taxas de resfriamento, em função da posição e do tempo durante o processo de resfriamento (figura 2).

Em posições mais próximas da base, observa-se uma declividade maior da curva de resfriamento, comprovada pelo cálculo das taxas média de resfriamento (figura 2) obtidas, utilizando-se

os valores de resfriamento entre 500°C e 800°C (ASM METALS HANDBOOK, 1991).

Observa-se na curva de 50mm, a 700 °C e 100 segundos na figura 2, que existe uma variação na curva de resfriamento, tendência de formação de um patamar, devido à geração de calor ocorrida no início da decomposição da austenita. Pode-se observar melhor esse fenô-

meno da decomposição austenítica com maior precisão através da figura 3, na qual é apresentada a aplicação de Análise Diferencial Térmica (Cota, 2002) na curva de resfriamento para posição de 50mm. Nessa posição a decomposição da austenita se revela em uma descontinuidade da curva, módulo da primeira derivada em função do tempo, em forma de um vale.

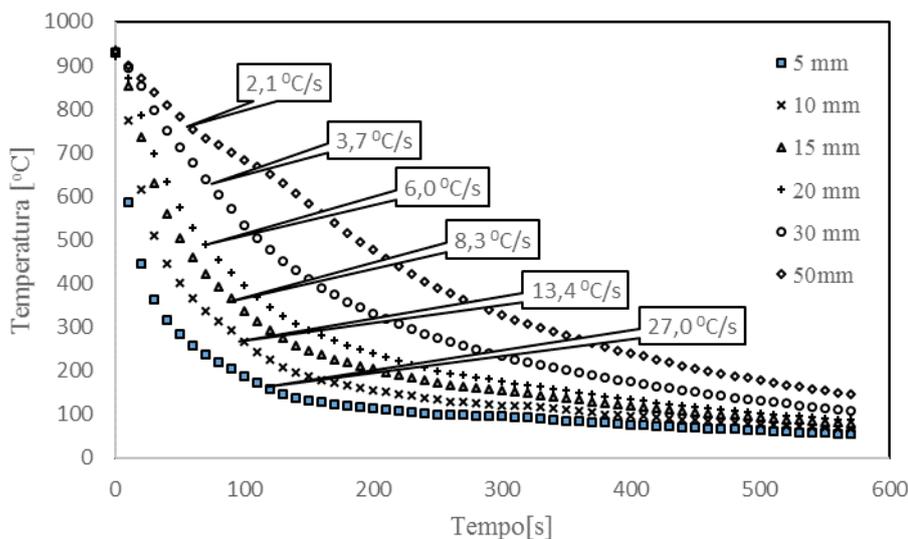


Figura 2 – Curvas de resfriamentos, com respectivas taxas médias (°C/s), obtidas no ensaio Jominy monitorado do Aço SAE 1026 em função da posição (5, 10, 15, 20, 30, 50 mm) com relação a base do corpo de prova, temperatura e tempo.

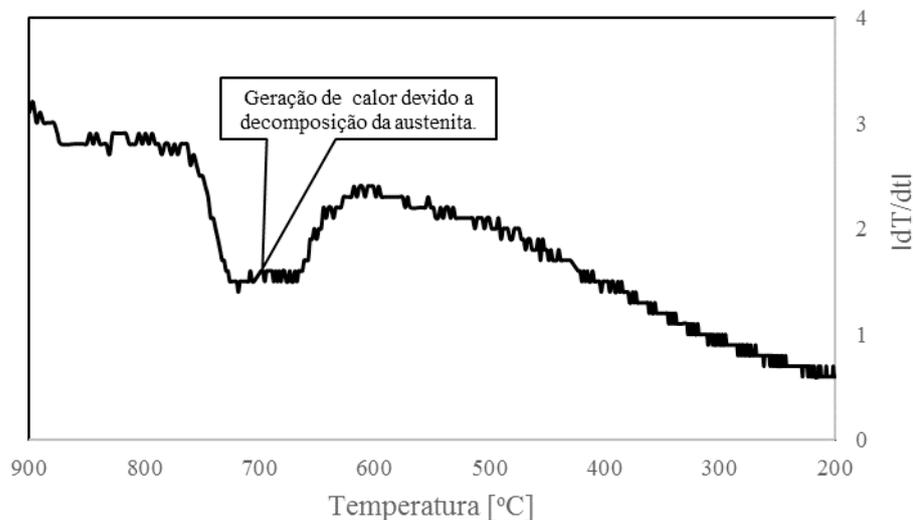


Figura 3 – Curva do módulo da primeira derivada ($|dT/dt|$) da curva de resfriamento da posição 50 mm em função da temperatura, destacando uma descontinuidade relativa à geração de calor por mudança de fase.

3.2. Dureza e taxas de resfriamento

A medição de dureza permitiu a obtenção do perfil de dureza observado na Figura 4, onde os valores das durezas e taxas decrescem com o afastamento da base do corpo de prova. Os resultados das durezas obtidas mostram-se coe-

rentes quando comparados com suas respectivas taxas de resfriamento. Esse comportamento pode ser explicado por um menor super-resfriamento, uma maior difusão e uma menor nucleação que resulta em uma estrutura de perlita grosseira (mais concentrada e menos dispersa na matriz, menor dureza) e também menor a

possibilidade de obter-se martensita e bainita, microconstituintes responsáveis pelo acréscimo de dureza (COLPAERT, 2008) e (CALLISTER, 2004).

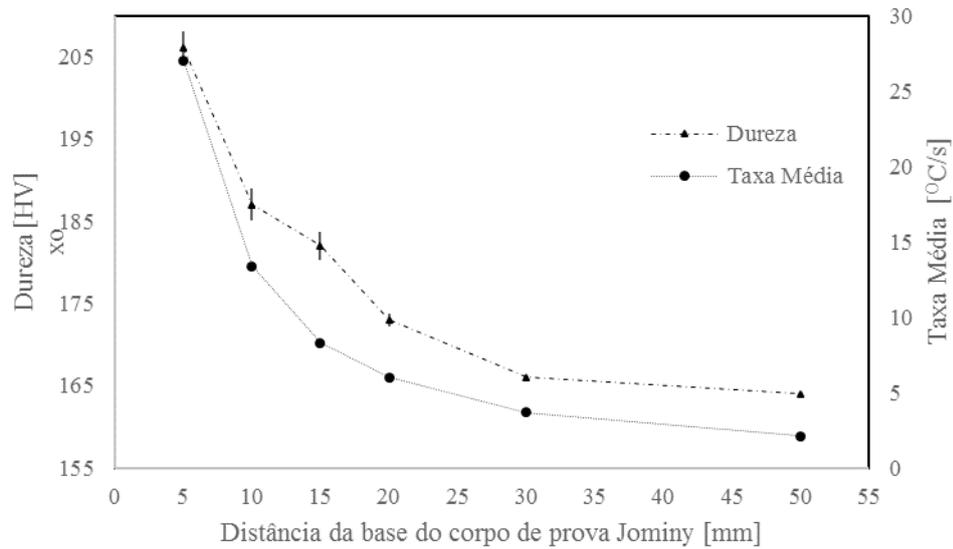


Figura 4 – Gráfico da variação da dureza e da taxa média de resfriamento em função do afastamento da base do corpo de prova do ensaio Jominy monitorado.

3.3. Caracterização Microestrutural

De acordo com afastamento da base do corpo de prova, variações da morfologia e das frações dos microconstituintes (ferrita, perlita e bainita) foram observadas. Conforme se afasta da base do corpo de prova, decresce a taxa média de resfriamento, a ferrita se modifica de acicular para uma morfologia equiaxial e sua fração volumétrica assume um comportamento crescente, bem como, a perlita se modifica de uma morfologia fina para uma grosseira e sua fração volumétrica assume um comportamento decrescente. Outro microconstituente, a bainita, que é decrescente, foi encontrado nas posições de 5 e 10 mm,

como pode-se observar na figura 5 para posição de 5mm. Analisando o comportamento entre as frações volumétricas dos microconstituintes correlacionadas com as taxas de resfriamento (figura 6), pode-se afirmar que quanto maior a taxa de resfriamento, maior será a fração de perlita e bainita e menor será a ferrita pró-eutetóide, completamente de acordo com fenômeno de nucleação e crescimento (COLPAERT, 2008), no qual quanto maior o super-resfriamento (taxa de resfriamento) maior será a formação de núcleos e menor será a difusão, propiciando assim o refino e a dispersão da perlita pela matriz, contribuindo para o aumento da dureza (tabela 1) também observado por Filho, 2004.

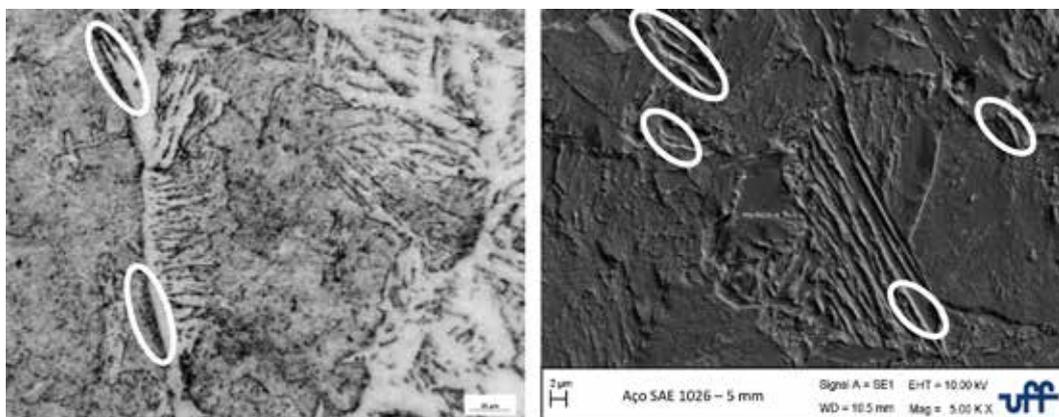


Figura 5 –Fotomicrografia SAE 1026. Em destaque o microstituente Bainita. À esquerda, revelado com Le Pera , posição 5mm (ampliação 1000X- microscopia ótica). À direita, revelado com Nital, posição 5mm (ampliação 5000X- Microscopia Eletrônica de Varredura).

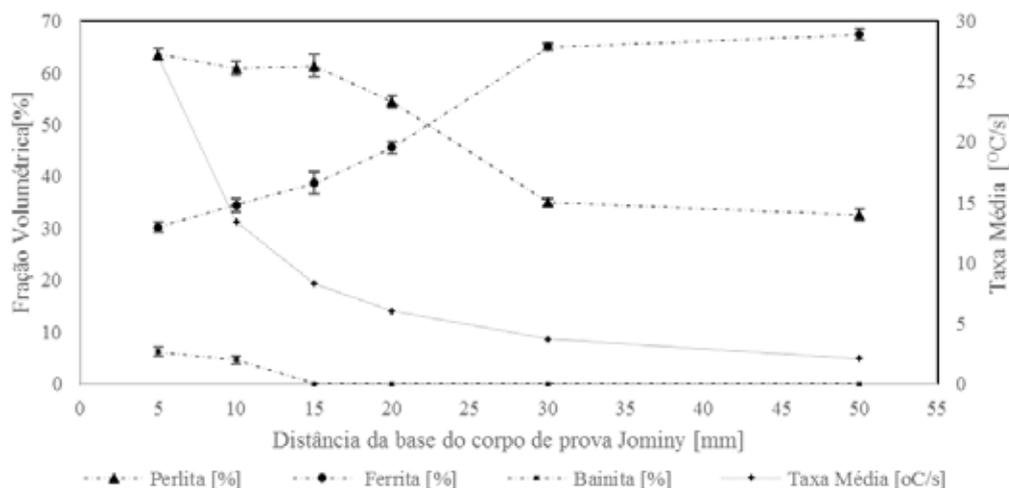


Figura 6 – Gráfico da variação da fração volumétrica dos microconstituintes formados e da taxa média de resfriamento em função do afastamento da base do corpo de prova no ensaio Jominy monitorado.

Tabela 1 – Resultados de fração volumétrica dos constituintes, dureza e taxa média obtidos no ensaio Jominy monitorado do aço SAE 1026.

Distância da Base (mm)	Fração Volumétrica da Perlita (%)	Erro Padrão Absoluto Perlita	Fração Volumétrica da Ferrita (%)	Erro Padrão Absoluto Ferrita	Fração Volumétrica da Bainita (%)	Erro Padrão Absoluto Bainita	Dureza (HV)	Taxa Média (°C/s)
5	63,55	1,03	30,24	1,03	6,21	0,82	206	27,0
10	60,87	1,37	34,50	1,26	4,63	0,73	187	13,4
15	61,29	2,17	38,71	2,10	0	0	182	8,3
20	54,41	1,14	45,59	1,18	0	0	173	6,0
30	35,01	0,71	64,99	0,71	0	0	166	3,7
50	32,63	1,09	67,37	1,14	0	0	164	2,1

4. Conclusões

O monitoramento da temperatura durante o ensaio Jominy resultou em um eficiente método de simulação experimental para caracterização dos microconstituintes, decorrentes da variação das taxas de resfriamento e como consequência da variação das propriedades mecânicas.

O equipamento projetado apresentou-se eficiente para simulação de várias taxas de resfriamento em um único experimento, sem perdas de dados e sem variação dos parâmetros do ensaio (vazão de água, posicionamento do corpo de prova e mudança do meio refrigerante), o que garante uniformidade e repetitividade dos experimentos.

As frações volumétricas da ferrita apresentaram-se crescente com a redução das taxas de resfriamento e sua morfologia variou de acicular até equiaxial.

As frações volumétricas da perlita apresentaram-se decrescente, com a redução das taxas de resfriamento e sua morfologia variou de perlita fina e bainita, perlita fina até perlita grosseira.

Com relação às propriedades mecânicas, a dureza reduziu com o decréscimo das taxas de resfriamento.

Observou-se a geração de calor devido à decomposição da austenita na posição de 50mm com relação à base do corpo de prova do ensaio.

5. Referências

ABNT. NBR 6339/1989. **Aço – Determinação da Temperabilidade Jominy**. 1989.

ABDALLA, A.J., et al. Formação de Fase Bainítica em Aços de Baixo Carbono. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v25, nº3, páginas 175-181, 2006.

ASM, **Metals Handbook, Heating Treating**. Vol. 4, 1991.

ASTM A-255. **Determining Hardenability of Steel**. 1999.

BORTOLETO, E.M. **Modelamento Numérico Computacional das Transformações de Fases nos Tratamentos Térmicos do Aço**, Dissertação de Mestrado, USP (Universidade de São Paulo), 2010.

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. São Paulo, 2008.

CHEN, J.R., et al. Study on Heat Conduction With Variable Phase Transformation Composition During Quench Hardening. **Journal of Materials Processing Technology**, 1997, 32, 339-347.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. ed. 4. São Paulo, 2008.

COSTA E SILVA, A. SAM-CONAMET 2009, **9º Congresso Internacional de Metalurgia y Materiales**, Argentina 2009.

COTA, A.B., et al. Determination of CCT Diagrams by Thermal Analysis of a HSLA Bainitic Steel Submitted to Thermomechanical Treatment. **Scripta Materialia**, v. 40, n.2, 1999, p.165-169.

COTA, A.B. Influência da Temperatura de Austenitização sobre a Cinética de Formação da Ferrita em um Aço microligado com Nb, **Metalurgia e Materais**, 2002.

DEL SANT, R. **Estudo da Transformação da Austenita Retida em Martensita Induzida por Deformação Plástica em Aços Multifásicos**, tese de doutorado, UNESP (Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá), 2010.

FILHO, C.H.M.A. **Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no Gradiente Microestrutural de Barras Laminadas Quente Tratadas Termicamente**, dissertação de mestrado, PUC-PR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná), 2004.

KANDPAL, B.C. A Review on Jominy Test and Determination of Effect of Alloying Elements on Hardnability of Steel Using Jominy end Quench Test, **Journal od advances in Engeneering & Tecnology**, 2011.

MARTINS, M. **Temperabilidade Jominy e Influência do Revenido Sobre a Dureza – Um Estudo em Aços Estruturais Nacionais**, dissertação de mestrado, UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), 2002.

OLIVEIRA, S. L.G., et al. Simulação do Resfriamento de Chapas de Aço em Laminação Controlada, **Matéria**, Vol. 9, Nº 1,43 – 54, 2004.

OLIVEIRA, W.P., et al. Thermomechanical Analysis of Steel Cylinders Quenching Using a Constitutive Model with Diffusional and Non-Diffusional Phase Transformations, *Mechanics of Materials*, 2010, **Mechanics of Materials**, 42, 31-43.

RETI, T., et al. Computer Simulation of Steel Quenching Process Using a Multi-Phase Transformation Model. **Computational Materials Science**, 2001, 22, 261-278.

SANTOS, A.A. **Modelamento da Transformação de Fases de Aços de Alta Resistência Microligados ao Nb Durante Resfriamento Após Laminação em Tiras a Quente**, tese de doutoras, UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), 2007.

SOUZA, L.L. **Estudo para Obtenção da Microestrutura Ferrítica-Bainítica em Aços Laminados a Quente do Tipo: C-MN e C-Mn-Nb**, dissertação de mestrado, UFF – EEMVR (Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda), 2008.

SOUZA, G.A. **Caracterização Microestrutural de Um Aço Médio Carbono e Baixa Liga (Com Estrutura) Bainítica/Martensítica) Via Microscopia Óptica**, dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. 2008.

XAVIER, C.R. et al. Projeto e Construção do Aparato Jominy: Uma Contribuição para a Pesquisa, UniFOA, **Cadernos UniFOA**, edição 10, 2009.

XAVIER, C.R. **Simulação de Temperatura e Transformação de Fases na Soldagem MIG de Aços**, tese de doutorado, UFF – EEMVR (Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda), 2008.