

ESTUDO DA SOLIDIFICAÇÃO DO AÇO RÁPIDO M2 EM DIFERENTES LINGOTES¹

Magno Pereira Delgado²
Rafael Agnelli Mesquita³
Celso Antonio Barbosa⁴
Thomaz Ishikawa⁵

Resumo

Os aços rápidos são principalmente empregados em ferramentas de corte, como brocas, machos e fresas de topo. Sua microestrutura é composta por martensita, com alta dureza e alta resistência ao revenido, e carbonetos nela dispersos. Os principais elementos de liga empregados no aço rápido M2 são Mo, W e V. O presente trabalho discute os efeitos do tamanho de lingotes, do tamanho das células e das taxas de resfriamento na microestrutura bruta de solidificação desta liga. Essas variáveis afetam diretamente o tamanho e a distribuição desses carbonetos após conformação a quente, que vão agir diretamente nas propriedades finais desses materiais, principalmente resistência ao desgaste e tenacidade.

Palavras-chave: Aço rápido; Solidificação; Microestrutura; Tamanho de célula; Taxa de resfriamento.

HIGH SPEED STEEL M2 SOLIDIFICATION STUDY IN DIFFERENT INGOTS

The high speed steels are mostly applied in cutting tools, like drills, cores and top milling cutter. Its microstructure is composed by martensite, with high hardness and strong tempering resistance and disperses carbides on it. The principal alloy elements utilized in the M2 high speed steel are the Mo, W and V. The present study discusses the ingot sizes effects, the cells sizes and the cooling taxes in the solidification rough microstructure of this grade. These variables affect directly the sizes and the carbides distribution after hot forming, which ones are going to act directly in the final properties of these materials, especially in the wear and toughness.

Key words: High speed steel; Solidification; Microstructure; Cell size; Cooling taxes.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produtos da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: magno.delgado@villaresmetals.com.br.

³ Engenheiro de Materiais, membro da ABM, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: rafael.mesquita@villares.com.br.

⁴ Engenheiro Metalurgista, membro da ABM, Gerente de Tecnologia da Villares Metals S. A., Sumaré - SP, Brasil, e-mail: celso.barbosa@villares.com.br.

⁵ Doutor em Materiais, membro da ABM, Professor da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos - SP, Brasil, e-mail: ishikawa@power.ufscar.br

1 INTRODUÇÃO

Os aços rápidos possuem este nome devido a sua capacidade de manter alto nível de dureza quando no processo de corte de metais ou outros materiais em alta velocidade. Esta classe de materiais constitui um dos mais complexos sistemas das ligas ferrosas, devido ao alto teor de carbono e elementos de liga. A microestrutura dos aços rápidos, na condição final de trabalho, é constituída de carbonetos primários dispersos em uma matriz de martensita revenida com alta dureza e resistência a quente.⁽¹⁾ O tamanho e a distribuição desses carbonetos influem, diretamente, nas propriedades finais desses materiais, principalmente em termos da resistência ao desgaste e tenacidade.⁽²⁾ Os processos utilizados na produção industrial dos aços rápidos, que influem na distribuição dos carbonetos são: a solidificação do lingote e a conformação a quente.^(1,2)

A estrutura bruta de solidificação é composta de eutéticos grosseiros e de baixa tenacidade e totalmente inviável ao uso.⁽³⁾ Para refino da estrutura são utilizados lingotes menores que geram menor espaçamento interdendrítico que, conseqüentemente, vai gerar uma melhor distribuição de eutéticos.⁽³⁾ Além disso, o processo de conformação a quente é fundamental, pois conduz o lingote (com centenas de quilos) até dimensões finais de uso, por exemplo, uma barra para produção de uma broca. Nesta etapa, a deformação aplicada “quebra” a microestrutura bruta, gerando fragmentação dos eutéticos iniciais para carbonetos menores.^(1,2) Este refino é significativo devido aos elevados graus de redução aplicados (da ordem de 97%).⁽¹⁾

Apesar de importante, a etapa de conformação a quente não é capaz de proporcionar uma microestrutura adequada para a aplicação, se estrutura bruta é demasiadamente grosseira. Isto limita, por exemplo, o tamanho inicial dos lingotes a 300 a 400 mm de secção.⁽¹⁾ Portanto, a distribuição final dos carbonetos dependerá de dois fatores principais:

- a) do tamanho do lingote e da estrutura bruta de fusão resultante;
- b) da conformação a quente aplicada, mensurada pelo grau de redução.

Apesar de conhecidos desde final do século XIX,⁽¹⁾ os aços rápidos são ainda muito estudados na literatura, devidos às suas elevadas propriedades mecânicas e de resistência ao desgaste,⁽⁴⁻⁷⁾ bem como por sua metalurgia complexa.⁽⁶⁻⁸⁾ Na literatura recente, destacam-se os estudos na solidificação por processos não convencionais^(4,8-11) ou por modificações de composição química.⁽⁶⁾ Além disso, são interessantes os estudos recentes de avaliações de propriedades mecânicas, da conformação a quente destes materiais ou do seu tratamento térmico.^(7,8,12,13)

Na solidificação do aço rápido, uma vez iniciado o processo, ele se torna irreversível para os constituintes primários formados (carbonetos primários MC). Por isso a solidificação no aço rápido é a parte mais importante na formação da microestrutura do produto final.⁽¹⁾

O objetivo do presente trabalho visa estudar no processo de fundição convencional do aço rápido M2, o efeito do tamanho dos lingotes. Portanto, o trabalho fará uma correlação da variação da microestrutura bruta de fusão em relação ao tamanho de células, as taxas de resfriamentos segundo equações determinadas por Gunji⁽¹⁴⁾ e avaliação de segregação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliados lingotes de três tamanhos diferentes: 100 Kg, 800 Kg e 1.600 Kg, denominados, respectivamente, de L1, L3 e L4. Todos fundidos em uma mesma placa de lingotamento, de uma mesma corrida de M2 (DIN WNr 1.3343, similar ao ASTM M2). Todos os lingotes com mesmo H / D (altura/seção transversal). A composição química da corrida conforme Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço estudado. % massa e balanço em Fe

| Liga | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | V | W |
|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| VWM2 | 0,88 | 0,35 | 0,34 | 0,028 | 0,001 | 4,35 | 4,74 | 1,73 | 6,07 |

A microestrutura dos lingotes foi observada por microscopia óptica, aumento de 100x, ataque nital 4% (4% de ácido nítrico em álcool), na região superior, conhecida como cabeça (a 1/9 da parte superior de H), na região do meio (H/2) e na região inferior, conhecida como pé (a 8/9 da parte superior de H). Em cada uma destas regiões, foi analisada microestrutura na superfície (a 10 mm da parede do lingote), meio raio (metade da distância da superfície – núcleo) e núcleo propriamente dito. O tamanho da célula eutética foi medido, de acordo com método contagem de interceptos em círculo de 250 μm (Método de Hillard).

Desta forma, as medidas microestruturais podem indicar indiretamente a taxa de resfriamento na solidificação, de acordo com a equação desenvolvida por Gunji⁽¹⁴⁾ – Equação 1. Gunji se baseou em experimentos em lingotes comerciais de 300 Kg, com lingotamento pela parte inferior, visando avaliar uma correlação entre a taxa de resfriamento na solidificação e a microestrutura, através de medições dos tamanhos de célula. Para isso, foram introduzidos termopares nos lingotes em posições diferentes (parede da lingoteira até o núcleo) visando avaliar as taxas de resfriamento e as microestruturas em cada posição estudada.

Relações empíricas entre os valores de Tamanho de Célula (TC) e a Taxa de Resfriamento (TR) foram levantadas por vários autores, sendo os principais Fischmeister⁽¹⁵⁾ e Gunji,⁽¹⁴⁾ onde A e b são os parâmetros da equação:

$$TC = A \cdot TR^{-b} \quad (\text{Equação 1}),$$

Onde: TC: espaçamento interdendrítico ou tamanho de célula;
TR: taxa de resfriamento;
A e b: são constantes, definidas experimentalmente.

Pelo trabalho de Gunji [15], tem-se $A = 220 \mu\text{m min } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $b = 0,29$.

Outros trabalhos baseados em experimentos similares^(14,16-18) confirmaram o método de Gunji, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: A e b são parâmetros da Equação 1⁽³⁾

| Experimental Method | A, $\mu\text{m s K}^{-1}$ | b | Ref. |
|---|---------------------------|---------------------|------|
| Unidirectional growth, variable growth rate | 32 | -0,28 | [15] |
| Unidirectional growth, variable growth rate | 35,7 | -0,35 | [16] |
| Unidirectional growth, constant growth rate | 43 | $-0,34 < b < -0,38$ | [17] |
| Unconstrained growth, variable growth rate | 42,1 | -0,32 | [18] |

3 RESULTADOS

3.1 Microestrutura Bruta de Fusão

Após solidificação e recozimento, os aços rápidos possuem microestrutura composta de carbonetos eutéticos ou primários, dispostos em uma matriz ferrítica com carbonetos finos (secundários) precipitados. Os carbonetos são resultados da rejeição de soluto na frente de solidificação, produzindo elevada concentração local de carbono e elementos de liga e a formação dos primários ou eutéticos.⁽¹⁻³⁾ Esses carbonetos dissolvem muito pouco durante os tratamentos térmicos subsequentes, sendo apenas fragmentados e alinhados pelo processo de conformação – dando origem a morfologia de estriais no produto final. Dependendo da concentração de carbonetos na microestrutura bruta, estas estrias podem se tornar demasiadamente espessas, sendo inviáveis para a aplicação final.

Portanto, a análise da microestrutura bruta de fusão faz-se necessária. Nelas podem ser observadas alta segregação, sendo referentes a regiões com alta concentração de carbonetos, em quantidades muito maiores no Lingote 4, associado à sua maior dimensão.

Estas regiões segregadas são mostradas na Figura 1, assim como as microestruturas comparativas para regiões do meio-raio dos 3 lingotes. Observa-se que, nos lingotes 1 e 3 não existem as regiões segregadas, enquanto que alta concentração de carbonetos é evidenciada para o Lingote 4. Além disso, observa-se um refinamento considerável nas células nos lingotes menores, de acordo com o esperado pela equação de Gunji.

3.2 Avaliações da Taxa de Resfriamento

A partir das microestruturas obtidas, foram medidos os tamanhos de célula e calculadas as taxas de resfriamento para as diferentes posições dos 3 lingotes, conforme mostrado na Tabela 3. Observa-se, assim como nas microestruturas, um refinamento das regiões da superfície para o núcleo, porém este não é linear. Ou seja, o refinamento é mais rápido da superfície até o meio-raio, seguindo em taxa menor do meio-raio para o núcleo.

Com estes resultados, o gráfico da Figura 2 foi obtido, correlacionando a taxa de resfriamento para a dimensão a partir da parede do molde (lingoteira), apenas para região à meia altura de cada lingote. Novamente, é observada uma queda

acelerada da taxa de resfriamento da superfície para o meio-raio, seguida de queda em menor inclinação. O efeito é maior nos lingotes maiores (3 e 4), porém pode ser observado nos três casos.

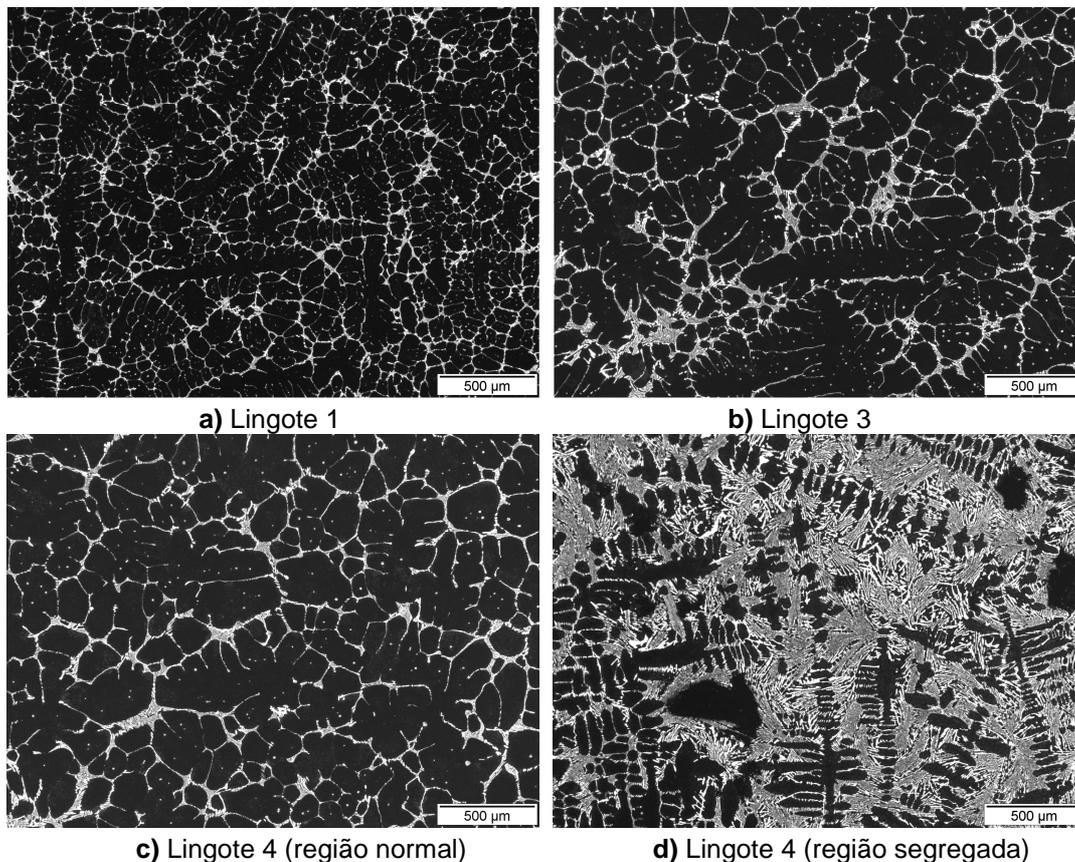


Figura 1: Microestrutura típica dos lingotes, associada à região segregada do Lingote 4 (único a apresentar segregação excessiva). Todas as microestruturas a meio raio (metade da distância da superfície – núcleo) e a meia altura do lingote.

Tabela 3: Medidas do tamanho de célula e da taxa de resfriamento para cada condição

| Tipo de Lingoteiras | Posição | Tamanho de Célula Médio (μm) | | | Taxa Resfriamento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) | | |
|---------------------|------------|---|------------|------------|---|------------|------------|
| | | Região do Lingote | | | Região do Lingote | | |
| | | Pé Ling. | Meio Ling. | Cab. Ling. | Pé Ling. | Meio Ling. | Cab. Ling. |
| Ling.1 | superfície | 46 | 43 | 43 | 221 | 270 | 276 |
| | 1/2 raio | 57 | 58 | 64 | 103 | 100 | 70 |
| | Núcleo | 60 | 77 | 84 | 89 | 37 | 27 |
| Ling. 3 | superfície | 56 | 57 | 61 | 112 | 103 | 85 |
| | 1/2 raio | 96 | 110 | 111 | 17 | 11 | 11 |
| | Núcleo | 109 | 133 | 140 | 11 | 5,7 | 4,7 |
| Ling. 4 | superfície | 51 | 51 | 50 | 154 | 150 | 168 |
| | 1/2 raio | 105 | 123 | 117 | 13 | 7,4 | 8,7 |
| | Núcleo | 139 | 165 | 195 | 4,9 | 2,7 | 1,5 |

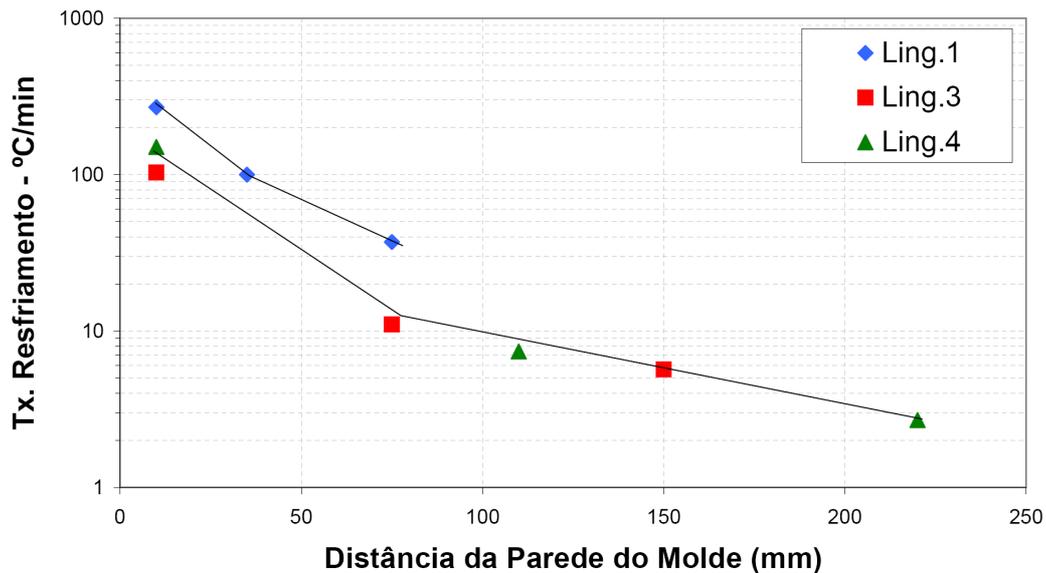


Figura 2: Taxa de resfriamento para os três lingotes em função da distância da parede do molde (lingoteira).

4 DISCUSSÃO

Primeiramente, é importante observar que, qualitativamente, observa-se o mecanismo clássico em todos os lingotes: células mais finas nos lingotes menores, devido à maior taxa de resfriamento. Porém, quantitativamente, ocorre uma mudança de comportamento no mecanismo de solidificação nas regiões próximas ao núcleo (Figura 2). Isto ocorre porque, da superfície até antes do meio-raio, a frente de solidificação pode ser entendida como unidirecional; assim, a equação clássica de Gunji e Firschmeister é seguida, Equação 1.^(14,15) Quando se aproxima do núcleo e das regiões equiaxiais, as outras frentes de solidificação passam a influenciar, de modo a acelerar a solidificação e diminuir a inclinação da reta da taxa de resfriamento em função da dimensão (Figura 2).

Os resultados apresentados mostram importantes características de diferentes tipos de lingotes. Lingotes menores promovem células menores e maior distribuição do soluto enriquecido (que resulta nos carbonetos eutéticos). Porém, este não é o único aspecto a ser considerado. Em lingotes maiores, como o lingote 4, podem surgir regiões demasiadamente segregadas (Figura 1d) que, após conformação a quente, geram estrias grosseiras. Em ferramentas de corte, tais estrias podem resultar em fraturas das regiões de corte (afiadas), sendo inaceitáveis. Além disso, por não serem homogeneamente distribuídas, podem resultar em empenamento após o tratamento térmico de têmpera da ferramenta.

Lingotes muito pequenos, por outro lado, podem não apresentar deformação suficiente das células quando conduzidos às dimensões finais. Isto será avaliado em trabalho futuro, assim como as propriedades mecânicas de cada condição.

5 CONCLUSÕES

- O modelo de Gunji pôde ser observado nos três lingotes, com comportamento distinto da solidificação unidirecional nas regiões do meio-raio (meia distância entre superfície e núcleo) até o centro do lingote.

- A definição do lingote deve levar em consideração o grau de deformação e sua microestrutura inicial. Neste último aspecto, o presente trabalho mostra ser importante correlacionar espaçamentos interdendríticos refinados e ausência de regiões segregadas.

REFERÊNCIAS

- 1 G. HOYLE, "High Speed Steels", Butterworths, first edition (1988).
- 2 G. ROBERTS AND R. CARY, "Tool Steels", fourth edition, 1980.
- 3 M. BOCCALINI AND H. GIOLDENSTEIN, "Solidification of High Speed Steel", International Materials Reviews, Vol. 46, 2001, p. 92-115.
- 4 Kim C. K.; Lee D-G; Lee S., " Correlation of microstructure and fracture properties of five centrifugal cast HSS rolls", Material Science and Technology. Vol. 23, pp. 1065-1074 (2007)
- 5 XU, LIUJIE; XING, JIANDONG; WEI, SHIZHONG; ZHANG, YONGZHEN; LONG, RUI, "Study on relative wear resistance and wear stability of HSS with high Vanadium content", Wear. Vol. 262, pp. 253-261, (2007).
- 6 WANG, MINGLIA; MU, SONGMEI; SUN, FEIFEI; WANG, YAN; "Influence of rare Earth Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Cast High Speed Steel Rolls, Journal of Rare Earths (English Edition). Vol.25, pp. 490-494, (2007).
- 7 ZHANG, XIAODAN; LIU, WEI; SUN, DALE; LI, YOUGUO, "The transformation of Carbides during Austenitization and its effect on the wear resistance of High Speed Steel (HVHSS) rolls, Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 38A, pp. 499-505, (2007).
- 8 KLOCK, A; DOBRZANSKI, L. A.; MATULA, G.; TORRALBA, J M, " Effect of manufacturing methods on structure and properties of the gradient tool materials with the non-alloy steel matrix the HS 6-5-2 type High Speed Steel", Material Science Forum. Vol. 539-543, Part 3, pp. 2749-2754 (2007)
- 9 MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A., "Evaluation of as-hipped PM high speed steel for production of large-diameter cutting tools. Materials Science Forum." , v. 416-418, p. 235-240, 2003.
- 10 MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A., "High-speed Steels Produced by Conventional Casting, Spray Forming and Powder Metallurgy". Materials Science Forum, , v. 498-499, p. 244-250, 2005.
- 11 MESQUISTA, R. A.; BARBOSA, C. A., "Spray forming high speed steel - properties and processing". Materials Science and Engineering A, , v. 383, n. 1, p. 87-95, Oct. 2004.
- 12 Mesquita, R. A.; Barbosa, C. A. "Efeito da temperatura de austenitização na tenacidade do aço rápido M2 medida através do ensaio de flexão". In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 55. 2000, Rio de Janeiro. Anais..., Rio de Janeiro: ABM, p. 1 CD ROM, 2000.
- 13 MESQUITA, R. A., "Effect of hardening conditions on the mechanical properties of high speed steels". European Conference on Heat Treatment 2008, , p. 8, 7-9 May 2008.
- 14 GUNJI, K.; KUSAKA, K., ISHIKAWA, E.; SUDO, K., "Solidification Structure of High Speed Tool Steel", Transactions ISIJ, Vol.14, 1974.
- 15 FIRSHMEISTER, H. F. AND OISSON, L., "ASM/SME Int. Conf. Cutting Tool Materials", 1980.
- 16 STOCKHOLM AND JERNKONTORET, "A guide to the Solidification of Steels", 134, 1977
- 17 H.F. FISCHMEISTER; R. RIEDL; S. KARAGÖZ., "Metall. Trans. A. 1989", 20A, 2133-2148.
- 18 BOCCALLINI, M., "PhD thesis", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 1996.