

Resumo

As temperaturas de transformação *solidus* (T_S) e *liquidus* (T_L) dos aços são parâmetros de grande importância em modelos numéricos de simulação do processo de lingotamento contínuo, pois define as temperaturas iniciais e finais da solidificação. Esse trabalho tem como objetivo a realização de ensaios experimentais de análise térmica de aços especiais visando a validação de equações empíricas da literatura. A análise térmica dos aços foi realizada com a fusão em forno de indução variando as temperaturas de superaquecimento. Os aços foram vazados em cadinhos de areia Shell instrumentados com termopares do tipo S acoplados a um sistema de aquisição de dados. A partir das curvas de resfriamento foram determinadas as T_S e T_L . Após, foi realizada a análise química dos aços em um espectrômetro. As T_S e T_L experimentais e obtidas por equações empíricas serão comparadas buscando a melhor aproximação dos resultados. Além disso, será analisada a influência do superaquecimento nas temperaturas de transformação.

Introdução

As temperaturas de transformação *solidus* (T_S) e *liquidus* (T_L) dos aços são parâmetros dependentes da composição e seus valores são de grande importância em qualquer modelo teórico de simulação de processos. Em algumas situações em que há dificuldade de se obter experimentalmente as temperaturas de transformação dos aços, T_S e T_L são estimadas pelo uso de equações empíricas que correlacionam as temperaturas de transformação com a composição química dos aços.

A literatura oferece algumas equações empíricas derivadas de análises de regressão para se chegar a valores aproximados desses parâmetros. A comparação de várias equações pode ter diferenças nos resultados, pois são originárias de diferentes composições de ligas. Assim, elas podem apresentar bons resultados para um grupo de ligas e podem falhar para outros.

Neste trabalho, T_S e T_L foram calculadas conforme as equações que seguem, e, posteriormente, comparadas com dados obtidos experimentalmente.

De acordo com Thomas, 1987:

$$T_L (^\circ\text{C}) = 1537 - 88(\%C) - 25(\%S) - 5(\%Cu) - 8(\%Si) - 5(\%Mn) - 2(\%Mo) - 4(\%Ni) - 1,5(\%Cr) - 18(\%Ti) - 30(\%P) - 2(\%V) \quad (1)$$

$$T_S (^\circ\text{C}) = 1535 - 200(\%C) - 183,9(\%S) - 12,3(\%Si) - 6,8(\%Mn) - 4,3(\%Ni) - 1,4(\%Cr) - 4,1(\%Al) - 124,5(\%P) \quad (2)$$

De acordo com Kim, 1996:

$$T_L (^\circ\text{C}) = 1536 - 78(\%C) - 7,6(\%Si) - 4,9(\%Mn) - 34,4(\%P) - 38(\%S) \quad (3)$$

$$T_S (^\circ\text{C}) = 1392 + 122(\%C) - 60(\%Si) + 12(\%Mn) - 140(\%P) - 160(\%S) \quad (4)$$

De acordo com Janik, 2004:

$$T_L (^\circ\text{C}) = 1536 - 78(\%C) - 7,6(\%Si) - 4,9(\%Mn) - 34(\%P) - 30(\%S) - 5(\%Cu) - 31(\%Ni) - 1,3(\%Cr) - 3,6(\%Al) - 2(\%Mo) - 2(\%V) - 18(\%Ti) \quad (5)$$

$$T_S (^\circ\text{C}) = 1471 - 25,2(\%C) - 12(\%Si) - 7,6(\%Mn) - 34(\%P) - 30(\%S) - 5(\%Cu) - 31(\%Ni) - 1,3(\%Cr) - 3,6(\%Al) - 2(\%Mo) - 2(\%V) - 18(\%Ti) \quad (6)$$

Materiais e Métodos

A análise térmica do aço foi realizada com a fusão em forno de indução variando as temperaturas de superaquecimento. As temperaturas de vazamento foram determinadas a partir das temperaturas liquidus e solidus, calculadas de acordo com as Eq. (1) e (2). Essas temperaturas calculadas foram de 1473°C e 1401°C, respectivamente. Os superaquecimentos (ΔT) objetivados foram de 5% (1550°C) e 10% (1620°C). Para a análise térmica foram utilizados cadinhos de areia Shell, instrumentados com termopares do tipo S acoplados a um sistema de aquisição de dados. A composição inicial do aço, obtida a partir de análise em um espectrômetro, é mostrada na Tabela 1.

Agradecimentos

Tabela 1: Composição inicial do aço.

C (%)	Cr (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mo (%)
0,54	0,66	0,15	0,63	0,028
Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ti (%)
0,1	0,018	0,007	1,35	0,004

Resultados e Discussões

Foram realizados dois vazamentos do aço superaquecido 5% e 10% da T_L . A partir das curvas de resfriamento foram determinadas as T_S e T_L experimentais. Após, foi realizado a análise química dos aços em um espectrômetro. As composições são mostradas a seguir, nas Tabelas 2 e 3. Da análise das curvas de resfriamento $T \times t$ foram obtidas T_L e T_S experimentais, conforme Figuras 1 e 2. A partir das equações empíricas e da composição dos aços obtidas após a espectrometria, foram calculadas as T_L e T_S teóricas. Essas temperaturas são mostradas na Tabela 4.

Tabela 2: Aço superaquecido 10%.

C (%)	Cr (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mo (%)
0,27	0,184	0,193	0,668	0
Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ti (%)
0	0,0197	0,016	0,173	0,0344

Tabela 3: Aço superaquecido 5%.

C (%)	Cr (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mo (%)
0,29	0,181	0,19	0,651	0
Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ti (%)
0,0781	0,0255	0,0202	0,17	0,0353

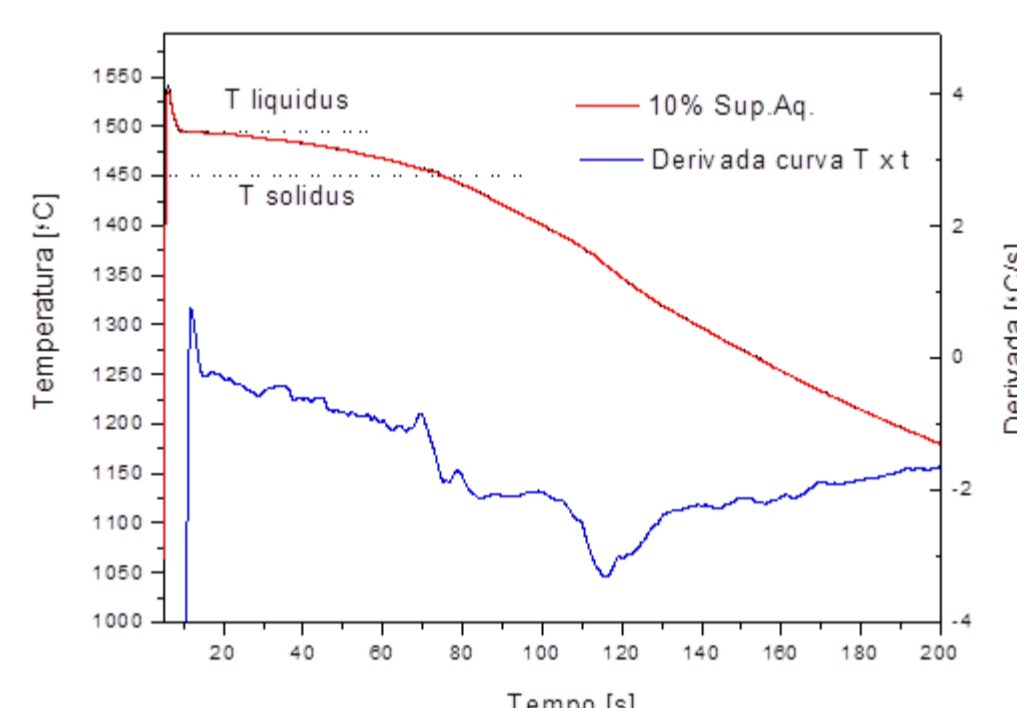


Figura 1: 10% de superaquecimento

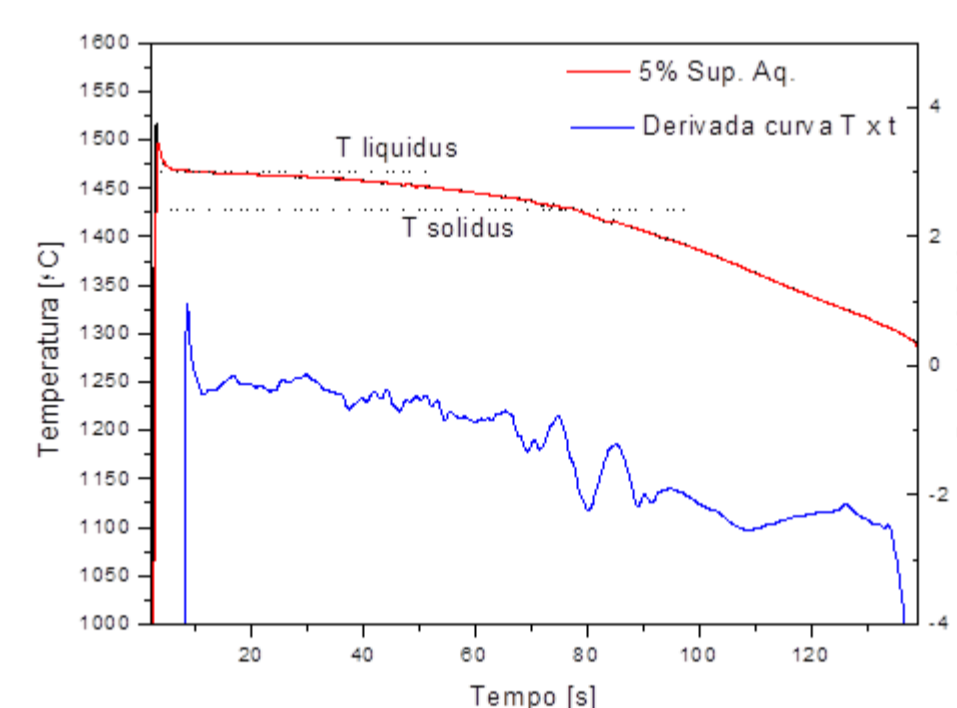


Figura 2: 5% de superaquecimento

Tabela 4: Comparação das T_L e T_S experimental e calculadas.

	ΔT 5%		ΔT 10%	
	T_L (°C)	T_S (°C)	T_L (°C)	T_S (°C)
Experimental	1470	1423	1495	1450
Thomas, 1987	1503	1463	1505	1468
Janik, 2004	1503	1451	1505	1452
Kim, 1996	1507	1418	1509	1417

Conclusões

Os resultados experimentais mostraram que houve decarbonetação do aço com a variação do superaquecimento. Em função disso, as temperaturas de transformação T_L e T_S também variaram. Foi possível constatar que as T_L e T_S calculadas pelas equações empíricas se aproximam dos valores experimentais. No experimento com 10% de superaquecimento, as equações (1) e (5) se aproximaram mais do valor da T_L experimental, enquanto que a equação (6) foi a que mais se aproximou do valor de T_S . No experimento com 5% de superaquecimento, nenhuma das equações se aproximou T_L experimental, enquanto a equação (4) obteve a melhor aproximação do valor da T_S experimental.

Referências

- KIM, Kyung-hyun; Yeo, Tae-Jung; Oh, Kyu Hwan; Lee, Dong Nyung. ISIJ International. V.36, No. 3, p. 284-289. 1996.
- THOMAS, B.G.; Samarasekera, I.V.; Brimacombe, J.K.; Metallurgical Transactions B, V. 18B, p. 119-130. 1987.
- JANIK, M., H. Journal of Materials Processing Technology. V. 158, p. 177 – 182. 2004.
- BARCELLOS, V. K. Dissertação de Mestrado. PPGEM-UFRGS. 2007