

ESTUDO DA CINÉTICA DE FLUTUAÇÃO DAS INCLUSÕES NÃO METÁLICAS DURANTE O PROCESSO DE TRATAMENTO DO AÇO EM FORNO PANELA¹

Gabriel Mesquita de Paula²
Marcolino Fernandes Neto³

Resumo

A qualidade do aço está diretamente ligada às inclusões não metálicas presentes no mesmo. Estas são inevitáveis e devem ser controladas de forma a se obter aços que atendam as exigências dos clientes. Através da utilização da Lei de Stokes pode-se prever o tamanho das inclusões que permanecerão no aço. Este trabalho buscou mostrar a eficácia desta lei, utilizando dados práticos retirados de um trabalho feito em uma indústria nacional, e também verificou-se que o tempo necessário para que as inclusões flitem até serem capturadas pela escória é menor do que a prevista pela Lei de Stokes, devido a agitação eletromagnética e injeção de argônio. Com isto, foi adequada a Lei de Stokes para prever com precisão o tempo de flotação necessário para que sejam eliminadas as inclusões não metálicas.

Palavras-chave: Refino secundário de aço; Inclusões não metálicas; Lei de Stokes.

STUDY OF KINETICS FLOTATION OF NON-METALLIC INCLUSIONS DURING THE STEEL REFINING PROCESS IN LADLE FURNANCE

Abstract

The quality of the steel is directly influenced by the presence of non-metallic inclusions. These are unavoidable and need to be controlled in order to obtain steels as customers demands. Through the Stokes law we can predict the inclusions' size that will remain in the steel. This project checked the law's effectiveness using practical data from a national industry. It concluded that the time necessary to overflow the inclusions until being part of the slag is lower than the previous in the Stokes' law. This project performed the Stokes' law to increase precision of the overflow time necessary to eliminated the no metallic inclusions.

Key words: Steel refining; Non-metallic inclusions; Stokes law

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Graduando em Engenharia Elétrica

³ Doutor em Engenharia Mecânica

INTRODUÇÃO

Com a crescente expansão do mercado siderúrgico, as empresas buscam sempre novas tecnologias e métodos para aumentar sua produtividade e qualidade.

Segundo Chiaverini,⁽¹⁾ os produtos siderúrgicos, ao serem fabricados, apresentam normalmente, além do carbono como principal elemento de liga, uma série de outros elementos de natureza metálica ou não, que são chamados de impurezas, que se originam de reações entre as matérias-primas empregadas ou de outros tipos de reações. As impurezas normais são: fósforo, enxofre, manganês, silício e alumínio. A maior parte delas reage entre si ou com outros elementos não-metálicos, como o oxigênio e, eventualmente, o nitrogênio, formando as chamadas inclusões não-metálicas.

De acordo com Finardi,⁽²⁾ as inclusões não-metálicas criam um campo de concentração de tensões ao seu redor, resultando no início de fraturas sempre a partir dessas regiões. As impurezas que ficam em solução sólida se concentram ao redor das inclusões, aumentando a concentração de tensões e agravando ainda mais o efeito prejudicial das inclusões nos aços. Como não é possível eliminar completamente as impurezas, e conseqüentemente as inclusões não-metálicas, é importante reduzi-las ao menor nível possível e controlar sua morfologia e distribuição no produto final. Para isso, utilizam-se elementos que apresentam uma forte afinidade pelo oxigênio, pelo enxofre e pelo nitrogênio, fixando estas impurezas na forma de inclusões estáveis. Os metais alcalino-terrosos, os de terras raras, zircônio e titânio oferecem boas possibilidades para este fim. Porém, os critérios de escolha têm de levar em conta a possibilidade de remoção de inclusões ainda no estado líquido, sendo interessante observar a massa específica das inclusões de óxidos formadas. Por exemplo, o óxido de cério tem massa específica muito semelhante à do aço líquido e tais inclusões serão dificilmente removidas do metal líquido. As inclusões de óxido de zircônio, embora não tenham massa específica elevada, são também de difícil flotação. A adição de magnésio no metal líquido é muito problemática devido a sua baixa temperatura de ebulição. Em virtude dessas considerações, o cálcio tornou-se o elemento preferencial para o controle das inclusões de óxidos e sulfetos no processo de fabricação de aço.

Conforme Neto,⁽³⁾ a formação de inclusões não-metálicas é uma conseqüência inevitável da físico-química das reações metalúrgicas que ocorrem durante o processo de fabricação dos aços. Deste modo, todos os tipos de aços contêm inclusões não-metálicas de alguma espécie, no mínimo em pequenas quantidades. Apesar do volume proporcionalmente pequeno, tais inclusões influenciam as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade, a usinabilidade e o acabamento superficial dos produtos siderúrgicos. A intensidade da nocividade dessas inclusões depende da composição química, tamanho, morfologia e distribuição das mesmas nos aços.

De acordo com estudos experimentais citados por Carvalho,⁽⁴⁾ as inclusões de alumina, que são sólidas na temperatura de desoxidação do aço (1600 °C), são individualmente de pequenas dimensões (3 a 4 μm), porém tendem a se agrupar formando aglomerados (clusters), em razão das diferentes velocidades de subida e das colisões provocadas pelo movimento do banho durante a injeção de argônio e agitação eletromagnética. A coesão dessas partículas dá-se devido a condições termodinâmicas favoráveis, provocadas pela tensão superficial inclusão / aço líquido e ângulo de molhabilidade

Segundo Báez,⁽⁵⁾ para dimensões normais de panelas utilizadas no processo de tratamento do aço foi estabelecido experimentalmente que somente inclusões menores que 30 μm podem permanecer no aço líquido, por mais que 30 minutos. Por outro lado, Finardi,⁽²⁾ Báez⁽⁵⁾ e Neto⁽⁶⁾, acreditam que a utilização da lei de Stokes para determinar a velocidade de subida das inclusões é limitada e somente aplicável em inclusões sólidas com diâmetro inferior a 20 μm . Evidentemente que, na aciaria, tem-se movimento

turbulento que invalida quase que integralmente a lei de Stokes (considera fluxo lamelar), mas conforme trabalhos experimentais russos, citados por Báez, existe uma primeira aproximação teórica do fenômeno.

Neste sentido, foi proposto o estudo da cinética de flutuação de inclusões não metálicas durante o processo de elaboração do aço, em forno panela, utilizando a lei de Stokes, para prever com maior precisão o tamanho das inclusões que permaneceram retidas no aço.

MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com dados da tese de Neto⁽³⁾, foi observada uma corrida em uma indústria de grande porte nacional de onde coletou-se cinco amostras, em etapas bem definidas, conforme se segue: uma no convertedor LD; três no forno panela, sendo, depois da adição de alumínio (Al), após a adição de cálcio-silício (CaSi) e dez minutos após a adição de CaSi; e uma no distribuidor. Com a utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado a um Sistema de Análise por Energia Dispersiva (EDS), foram determinadas a composição química e tamanho das inclusões não metálicas, conforme Tabela 1. A composição química final do aço estudado é apresentada na Tabela 2.

Tabela 1. Composição química e tamanho das inclusões não metálicas analisadas

Inclusão	Raio (µm)	Al % peso	Si % peso	S % peso	Ca % pes	Mn % peso	Fe % peso	Mg % peso	Ti % peso	Cr % peso
1	50	14,18	16,2	0,58	56,23	3,36	4,33	5,11	0	0
2	50	20,69	15,09	0,71	49,04	3,6	3,73	7,15	0	0
3	25	17,64	0	0,55	0	0,14	81,12	0,55	0	0
Primeiro instante (t₀) – Convertedor LD.										
4	50	40,43	14,2	0,09	1,09	17,7	25,91	0,58	0	0
5	65	21,76	14,6	1,11	55,76	0,42	0,47	5,9	0	0
6	1,5	0,43	0,21	11,04	0	15,24	72,79	0,28	0	0
Segundo instante (t₀ + 52 minutos) – Início do Refino no forno panela.										
7	1,75	50,05	0	0,7	0,53	0,99	31,3	16,42	0,74	0
8	2,5	0	13,67	14,41	0,11	21,6	50,21	0	0	0
9	3	14,19	26,68	1,18	0,15	49,61	5,55	0	0,25	0,39
Terceiro Instante (t₀ + 62 minutos) – Durante o Refino no forno panela.										
10	50	20,56	8,58	1,43	64,42	0,37	0,65	3,99	0	0
11	50	27,54	13,55	1,1	47,13	0	0,87	9,81	0	0
12	5	0	0	34,62	0	21,08	44,21	0,01	0	0
Quarto Instante (t₀ + 90 minutos) – Final do Refino no forno panela.										
13	1,5	22,66	0,47	0,57	9,45	0,46	64,4	2	0	0
14	1	0	0	24,95	0	27,88	47,17	0	0	0
15	2,5	24,4	0,56	1,08	11,19	0,38	60,37	2,02	0	0
Quinto instante (t₀ + 120 minutos) – No Distribuidor										

Tabela 2. Composição química do aço desoxidado ao Al

%C	%Mn	%S	%Si	%P	%Al	%Ca	%N ₂
0,140	0,354	0,009	0,076	0,015	0,027	0,0018	0,0024

A cinética de remoção das inclusões formadas durante o processo de desoxidação do aço pelo alumínio ocorre devido à diferença de massas específicas (ρ). Como as inclusões possuem massa específica menor do que a do aço líquido, estas tendem a ser transportadas até a superfície superior do banho. Assim, a velocidade de transporte depende da massa específica, tamanho, forma das inclusões e da massa específica do aço. Assumindo a forma esférica e condições de escoamento laminar, a velocidade de ascensão das inclusões pode ser calculada pela lei de Stokes, de acordo com Neto,⁽⁶⁾ na forma:

$$V_a = 2 \Psi r^2 g (\rho_a - \rho_i) / 9\eta \quad (1)$$

onde:

V_a é a velocidade de ascensão da inclusão [m/h]

Ψ é a constante de ascensão [$\Psi = 1$ para metal líquido em repouso]

r é o raio da inclusão [m]

g é a constante gravitacional [$g=9,81 \text{ m/s}^2$ no nível do mar]

$(\rho_a - \rho_i)$ é a diferença entre massa específica do aço líquido e da inclusão [kg/m^3]

η é a viscosidade do aço líquido [$\eta = 0,0024 \text{ N s/m}^2$ para aço líquido a $1600 \text{ }^\circ\text{C}$]

De acordo com Trindade,⁽⁷⁾ a massa específica ou densidade do aço líquido é de 7350 kg/m^3 . Já a densidade das inclusões foi determinada através da equação (2), que leva em conta a densidade de cada elemento químico e a proporção dos mesmos na inclusão.

$$\rho_i = (\%Al/100) * \rho_{Al} + (\%Si/100) * \rho_{Si} + (\%S/100) * \rho_S + (\%Ca/100) * \rho_{Ca} + (\%Mn/100) * \rho_{Mn} + (\%Fe/100) * \rho_{Fe} + (\%Mg/100) * \rho_{Mg} + (\%K/100) * \rho_K + (\%Na/100) * \rho_{Na} + (\%Ti/100) * \rho_{Ti} + (\%Cr/100) * \rho_{Cr} \quad (2)$$

O valor da densidade pode ser obtido também através de estudos cristalográficos, onde, o composto é identificado e é encontrado o valor da sua cela unitária, determinando assim, através do raio atômico de cada elemento contido na cela, o volume e, conseqüentemente, a densidade do composto. Este é o método teórico mais preciso para determinar a densidade do composto formado, porém, foge ao escopo deste trabalho.

O valor de Ψ foi adotado, a princípio, como sendo unitário, e deverá ser alterado para a compatibilidade da Lei de Stokes com o processo Industrial.

Para prever o tamanho das inclusões que permaneceram no aço após todo o processo de refino, reajustou-se a equação (1) de forma a fornecer o tamanho das inclusões, conforme mostra a equação (3), baseado na velocidade mínima necessária para que estas se incorporem a escória, percorrendo a altura de 2,5 metros do forno panela. O tempo total, desde o vazamento do aço do LD para a Panela, tratamento e vazamento da Panela para o distribuidor, é de 120 minutos. Para este tempo a velocidade média mínima das inclusões para que estas se incorporem à escória é de $0,000347 \text{ m/s}$. Inclusões abaixo desta velocidade ficaram retidas no aço.

$$r = [9 \eta (V_{a \text{ mínima}}) / 2g\psi (7350 - \rho_i)]^{0,5} \quad (3)$$

onde,

$V_{a \text{ mínima}}$ é a velocidade média mínima para que as inclusões flitem até a superfície do banho [m/s]

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos através das equações (1) e (2).

Tabela 3. Valores determinados através das equações (1) e (2)

Composto	Diâmetro (μm)	Densidade ρ_i (kg/m^3)	Velocidade (m/s)
Inclusão 1	100	2313,43	0,0114370
Inclusão 2	100	2362,26	0,0113260
Inclusão 3	50	6891,95	0,0002600
Inclusão 4	100	4812,43	0,0057620
Inclusão 5	130	1975,05	0,0206270
Inclusão 6	3,5	7119,11	0,0000006
Inclusão 7	3	4230,73	0,0000063
Inclusão 8	5	6186,41	0,0000066
Inclusão 9	6	5213,80	0,0000175
Inclusão 10	100	1918,77	0,0123330
Inclusão 11	100	2042,54	0,0120520
Inclusão 12	10	5777,73	0,0000357
Inclusão 13	3	5916,71	0,0000029
Inclusão 14	2	6316,37	0,0000009
Inclusão 15	5	5680,28	0,0000094

Com o auxílio da equação (3) determinaram-se as maiores inclusões (com as mesmas composições químicas apresentadas na Tabela 1) que permanecerão retidas no aço após 120 minutos, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Diâmetro das inclusões que permanecerão retidas no aço.

Inclusão	Diâmetro (μm)
1	17,427
2	17,512
3	57,788
4	24,552
5	16,870
6	81,394
7	22,145
8	36,257
9	26,759
10	16,782
11	16,977
12	31,191
13	32,668
14	38,469
15	30,267

O gráfico da Figura 1 mostra uma relação entre a velocidade de ascensão com o diâmetro de cada inclusão, permanecendo o tempo de tratamento de 120 minutos e o valor de $\psi = 1$. Nota-se claramente que quanto maior é o tamanho das inclusões maior será a velocidade de ascensão das mesmas.

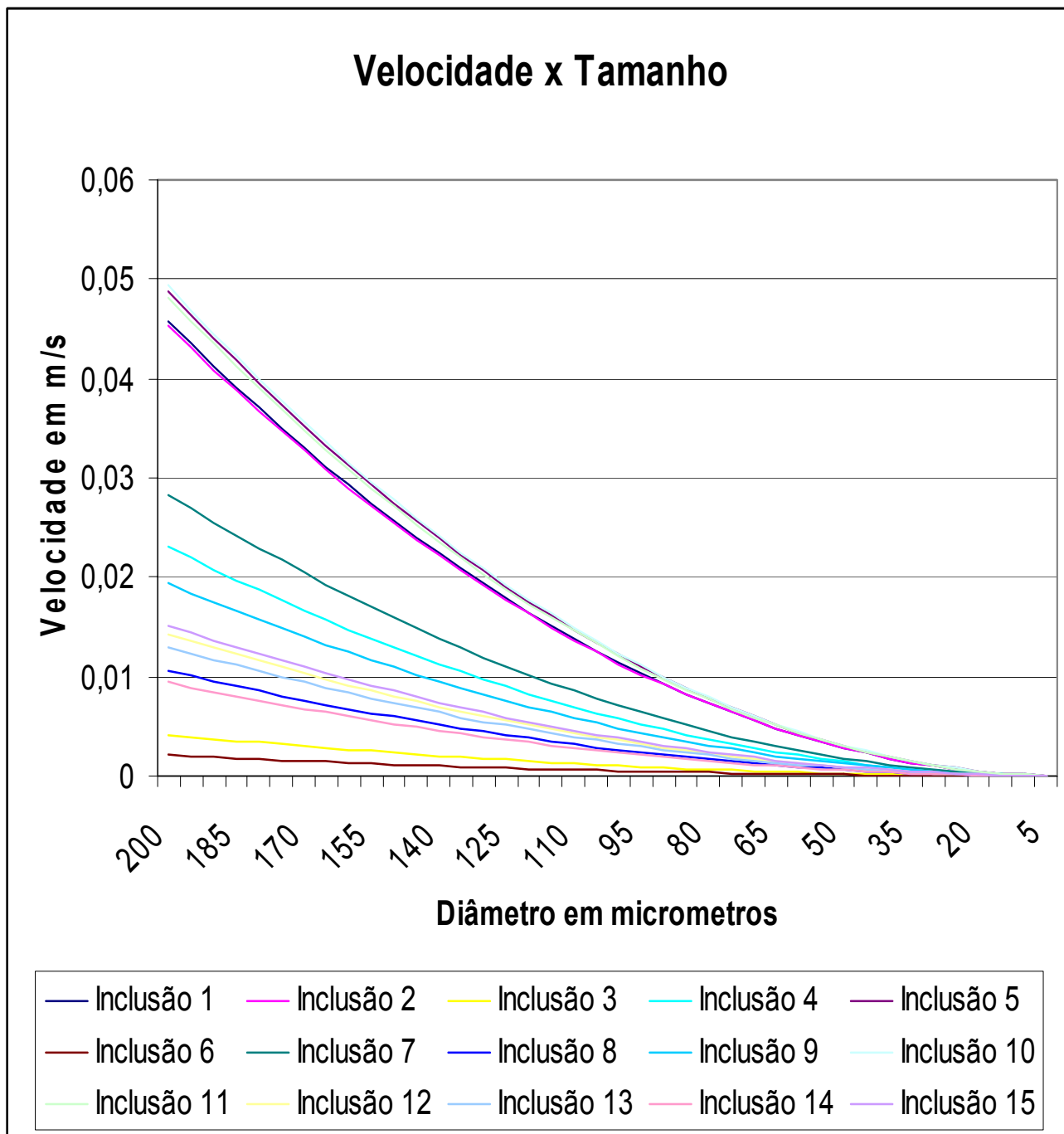


Figura 1. Gráfico demonstrativo da relação entre a velocidade de ascensão com o diâmetro de cada inclusão analisada.

A Figura 2 apresenta a relação entre as grandezas velocidade, tempo e tamanho. No gráfico, o lado direito especifica o tempo que cada inclusão leva para ser eliminada, incorporando-se à escória, o lado esquerdo tem-se a velocidade de ascensão e na base o diâmetro das inclusões. Como na prática o tempo de tratamento do aço foi de 120 minutos, inclusões com tempo de flotação maior do que o de tratamento permaneceram retidas (região sombreada).

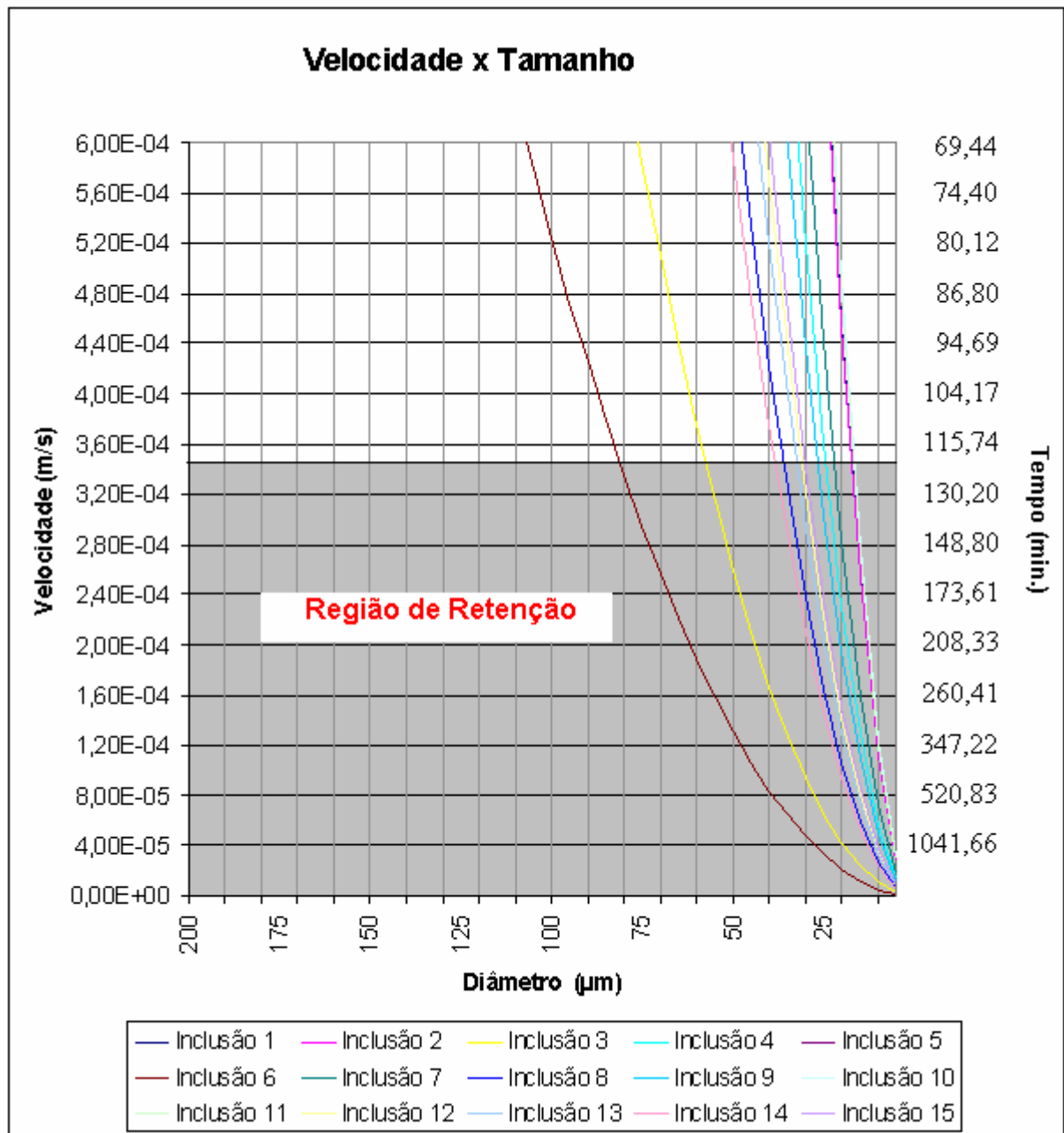


Figura 2. Relação entre as grandezas velocidade, tempo e tamanho.

Como os valores (tamanho das inclusões) encontrados na prática são bem menores do que os calculados pela lei de Stokes (equação 1), foi variado o valor de ψ de 1 a 100, de forma a encontrar um resultado que se aproximasse dos valores práticos, como mostra o gráfico da Figura 3. Para o valor de ψ igual a 60 têm-se valores dos raios das inclusões mais próximos dos encontrados na prática, variando de 1,09 μm a 2,48 μm .

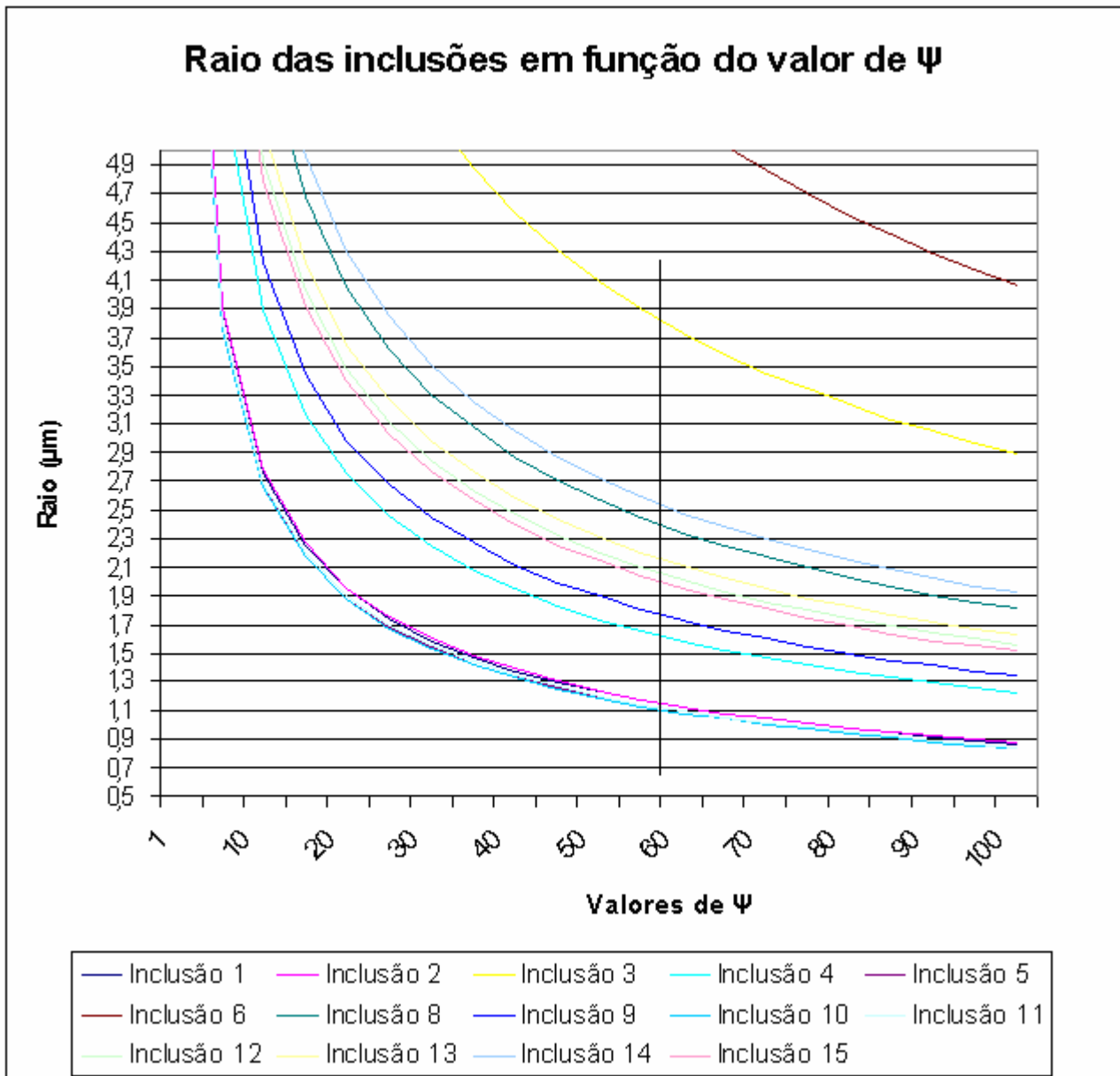


Figura 3. Raio das Inclusões em função do valor de ψ

De acordo com Baez,⁽⁵⁾ uma primeira aproximação teórica na utilização da Lei de Stokes para prever o tamanho das inclusões pode ser considerada.

Conforme visto no trabalho realizado, utilizando-se a lei de Stokes e valor de ψ igual a 60, tem-se que os tamanhos das inclusões calculadas apresentam aproximadamente os valores encontrados na prática.

O método aqui utilizado não prevê exatamente o tamanho das inclusões durante as etapas do processo de refino do aço, mas sim, as inclusões finais, que, já presentes no distribuidor, fatalmente estarão presentes no aço após o lingotamento, conforme mostra a Tabela 1, onde, pode-se observar a ocorrência de variação no tamanho das inclusões, durante as etapas. Como exemplo, pode ser citado a terceira etapa, onde, as inclusões eram da ordem de 5 μm de diâmetro e na quarta etapa eram de 100 μm .

Devido à prática industrial envolver a injeção de argônio no banho em conjunto com a agitação eletromagnética, há um favorecimento a eliminação das inclusões. Com a utilização do valor de ψ igual a 60, a Lei de Stokes passa a prever com precisão, o tamanho das inclusões que permanecerão retidas no aço, auxiliando o aciarista no controle destas, que são altamente prejudiciais a qualidade do produto final.

CONCLUSÃO

A Lei de Stokes, adaptada a prática industrial, será uma boa ferramenta de auxílio ao aciarista, preocupado com a qualidade, pois poderá determinar o tamanho das inclusões remanescentes no aço fabricado, baseado no tempo total de tratamento do banho no forno panela.

Agradecimentos

A PUC Minas Campus de Poços de Caldas e ao FIP (Fundo de Incentivo a Pesquisa) pelo custeio do trabalho e fornecimento da bolsa aos autores.

REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: Publicação ABM, 6ª Edição, 1988, 576 p
- 2 FINARDI, J.; Inclusões em Aço: Seu Efeito e seu Controle. II Congresso de Engenharia Metalúrgica da Universidade de Mackenzie, São Paulo - SP, p. 1-28, out.1989.
- 3 NETO, M.F.; Análise de inclusões não metálicas em aços de baixo carbono desoxidado ao alumínio produzido por lingotamento contínuo. UNICAMP, Campinas, SP: [s.n], 2001.
- 4 CARVALHO, J. L. R. & MARTINS, T. B.; Formação e Remoção de Micro Inclusões. Companhia Siderúrgica do Vale do Aço, Acesita - Aços Especiais Itabira, Timóteo - M.G., p. 1 – 63, 1980.
- 5 BÁEZ, H. N.; LIBANATI, C. M.; VASSALO, D. I.; WORTMAN, O.; ZARETZKY, Z. Identificação e Origem de Inclusões Não-Metálicas nos Aços. Metalurgia – ABM, v. 24, n. 128, p. 523-534, jul. 1968.
- 6 NETO, M.F.; Influence of refining time on nonmetallic inclusions in a low-carbon, silicon-killed steel. Materials Characterization, pp. 301-308. Janeiro de 2004.
- 7 TRINDADE, L.B.; FARIA VILELA, A.C.; DE VILHENA, M.T.M.B.; SOARES, R.B; Efeitos térmicos e fluido-dinâmicos devidos a um agitador eletromagnético para tarugos. UFRGS, Porto Alegre, RS. 2001