

MONITORAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO DESGASTE DOS TUBOS SUBMERSOS DAS MÁQUINAS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO EM TEMPO REAL¹

*Franz Ramstorfer²
Charlie Denis Cordeiro Silva³
Antonio Eli Nunes⁴
Danilo Di Napoli Guzela⁵*

Resumo

Este trabalho foi focado no desenvolvimento de um sistema de monitoramento e de um algoritmo de otimização do desgaste dos tubos submersos das máquinas de lingotamento contínuo em tempo real. O sistema de monitoramento foi desenvolvido para informar ao operador do molde sobre o estado do desgaste em tempo real durante o lingotamento. A utilização deste sistema evita primeiramente o risco da utilização excessiva e consequente quebra do tubo. Este tipo de incidente implica sempre em um risco considerável para os operadores que trabalham removendo as partes quebradas no interior do molde, no sentido de evitar o risco de rompimento de veio devido a um aprisionamento de material não metálico junto à frente de solidificação. Além das questões de segurança, esse sistema também contribui para aumentar o tempo de utilização do tubo, e consequentemente reduzir os custos de produção. Os parâmetros do modelo matemático existentes no sistema de monitoramento, que descrevem a velocidade e a forma do desgaste, foram ajustados através de uma série de exemplares de tubos utilizados pelo processo, medindo-se o desgaste dos mesmos. Além disso, um algoritmo de otimização do desgaste foi desenvolvido para controlar a profundidade de imersão do tubo submerso numa posição fixa, no sentido de maximizar o tempo de utilização. Com a implementação desses dois sistemas, não só o tempo de utilização dos tubos submersos pode ser melhorado, mas também, a segurança dos operadores e do processo.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Tubos submersos; Monitoramento de desgaste em tempo real; Otimização de desgaste.

REAL-TIME MONITORING AND WEAR OPTIMIZATION OF SUBMERGED ENTRY NOZZLES OF CONTINUOUS SLAB CASTERS

Abstract

The present work is focused on the development of a real-time monitoring system and an optimization algorithm of the wear of submerged entry nozzles (SEN) of continuous slab casters. The real-time monitoring system was developed in order to inform the operator about the actual state of SEN wear during casting. The utilization of this system avoids primarily the risk of an excessive use and a breakage of the SEN. This kind of incident always entails a considerable danger for the operators while removing the broken parts out of the mould and a risk of a breakout due to an entrapment of refractory parts in the strand too. Beside these essential safety issues, this system contributes as well a lot to an increase of the usage time and therefore to a reduction of the production costs. The parameters of the mathematical model behind the online system, which describe the speed and the shape of the wear, were adjusted by collecting process data and measuring the wear of various nozzles utilized at different casting conditions. Additionally, a wear optimization algorithm was developed for controlling the immersion depth of the SEN in order to maximize the usage time even it was already used at a constant immersion depth for some time. With the implementation of these two systems, not only the usage time of the submerged entry nozzles could be enhanced significantly, but also, at the same time, the operator- and process safety.

Key words: Continuous slab casting; Submerged entry nozzles; Real-time wear monitoring; Wear optimization.

¹ *Contribuição técnica ao 44º Seminário de Aciaria – Internacional, 26 a 29 de maio de 2013, Araxá, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico PhD, Especialista de processos, Usiminas, Minas Gerais, Brasil.*

³ *Engenheiro Eletricista, Engenheiro de manutenção, Usiminas, Minas Gerais, Brasil.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, Gerente de lingotamento, Usiminas, Minas Gerais, Brasil.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista, Gerente de processos de aciaria, Usiminas, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Durante o processo de lingotamento contínuo, o aço líquido tem que ser fornecido ao molde constantemente e protegido contra a oxidação. Os tubos submersos, feitos de material refratário numa base de alumina-grafite ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{C}$), são utilizados para atender a essas necessidades. O pó fluxante é espalhado sobre o aço líquido no molde para protegê-lo da oxidação, lubrificar o veio sólido no molde e prender as inclusões não metálicas. Além das suas funções principais, o pó fluxante causa uma erosão externa do tubo submerso na zona de contacto no menisco. Nesta região, onde o tubo submerso está em contato com o pó fluxante líquido, o corpo do tubo submerso é protegido adicionalmente com uma camada protetora de zircônia-grafite, (ZrO_2C) devido à sua resistência elevada contra a corrosão. A Figura 1 mostra uma seção longitudinal de um tubo submerso depois do uso em três profundidades de imersão i.e. 135 mm, 155 mm e 175 mm.

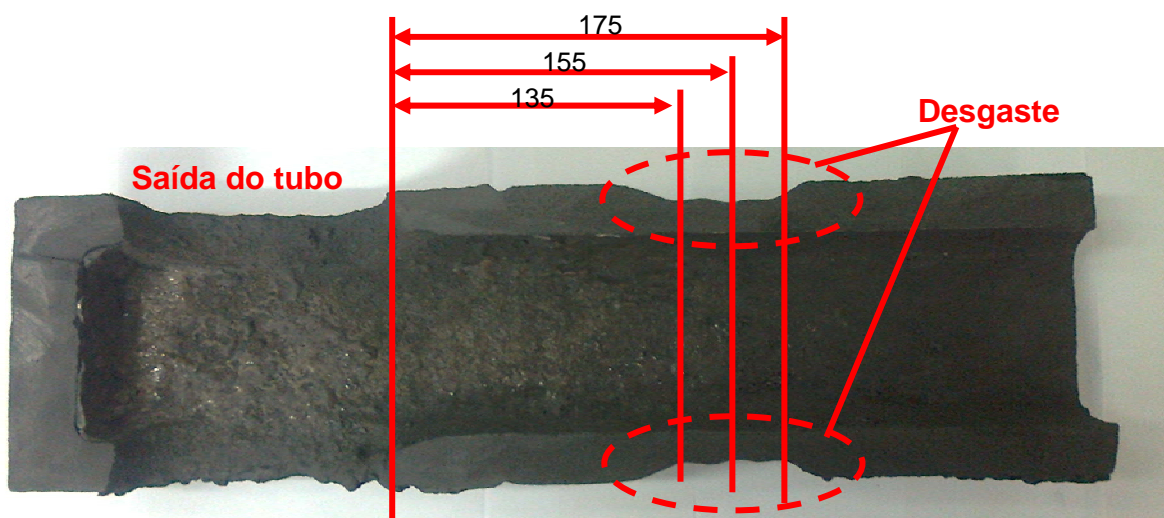


Figura 1. Seção longitudinal de um tubo submerso depois do uso em três profundidades de imersão.

Os modelos do ataque do tubo submerso, que foram propostos, são baseados em forma de mecanismo de dissolução cíclico dos componentes refratários principais, zircônia e grafite.^(1,2) Como um resultado, o processo de corrosão depende principalmente do tipo de pó fluxante,^(3,4) do teor de carbono do aço lingotado^(1,5) e das características do material refratário.^(1,3) Em particular, um pó fluxante com uma menor viscosidade e um maior teor de flúor, provoca um desgaste mais rápido do material refratário. Os estudos também mostram que os aços de baixo teor de carbono têm um maior desgaste do refratário devido a uma dissolução maior do grafite. Também um teor de zircônia mais alta da camada protetora possui uma taxa de erosão menor.

Em caso de uso excessivo do tubo submerso, ele pode ser furado ou pode quebrar devido à falta de monitoramento e o controle do desgaste. Em caso de quebra do tubo submerso, os operadores têm que "pescar" as peças quebradas, a qual é uma atividade perigosa. Se permanecerem os restos do tubo submerso dentro do molde, pode causar um rompimento de pele do aço que ainda não solidificou completamente, com consequências imprevisíveis de segurança operacional e perda na produção. O objetivo é otimizar o tempo de uso do tubo submerso (redução de custos) e no mesmo tempo a segurança dos operadores e do processo tem que ser garantida também. Um modelo matemático do desgaste do tubo submerso foi

apresentado em trabalhos^(6,7) buscando otimizar o desgaste do tubo, como uma ferramenta de simulação tipo off-line. Ou seja, a ferramenta de simulação só foi utilizada para desenvolver estratégias de uso dos tubos submersos, que não resultam em uma ajuda ao operador durante o processo de lingotamento real, porque o controle do desgaste fica ainda na responsabilidade dos operadores, através de um controle do tempo de operação e profundidade do tubo submerso.

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um sistema de monitoramento do desgaste do tubo submerso, em tempo real, utilizando um modelo matemático do desgaste e o desenvolvimento de um algoritmo de otimização baseado do desgaste calculado em tempo real.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do Desgaste

O primeiro passo do desenvolvimento foi a caracterização do desgaste através de medições do desgaste de vários tubos submersos utilizados em condições de uso diferentes. Neste trabalho, o resultado da caracterização de quatro tubos utilizados na máquina de lingotamento 3 em Cubatão é mostrado. Estes tubos com um corpo de alumina-grafite e uma camada protetora de zircônia-grafite (84% teor de zircônia) na região de contato com o pó fluxante líquido foram analisados. As composições químicas desejadas do tipo de aço de médio carbono e do pó fluxante são mostradas nas tabelas abaixo.

Tabela 1. Composição química do aço lingotado

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti
Teor obj. [%]	0.160	1.100	0.270	0.022	0.008	0.030	0.035

Tabela 2. Composição química do pó fluxante

Elemento	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	F	Cliv	CO ₂
Teor obj. [%]	30.3	39.4	2.3	3.3	7.8	7.7	3.0	5.6

Além da composição química, o pó fluxante é caracterizada por uma basicidade (CaO/SiO_2) = 1.3 e uma viscosidade na temperatura de 1300°C = 0.7 Pas.

Para caracterizar o desgaste real, vários tubos usados foram cortados (Figura 1) e os perfis de desgaste foram medidos manualmente. Nas Figuras 2 e 3, os perfis de desgaste diferentes são mostrados. Na Figura 3, a camada protetora é mostrada em amarelo. A Figura 4 mostra a profundidade de imersão, durante a utilização de cada tubo.

As Figuras 4 e 5 mostram também que o Tubo #1 foi utilizado excessivamente numa profundidade de imersão de 145 mm. O desgaste observado nesta posição já ultrapassou a camada de zircônia. A seguir, estes dados de medição são utilizados para elaborar um modelo matemático do desgaste.



Tubo #1

Tubo #2

Tubo #3

Tubo #4

Figura 2. Regiões de desgaste dos quatro tubos submersos analisados neste trabalho.

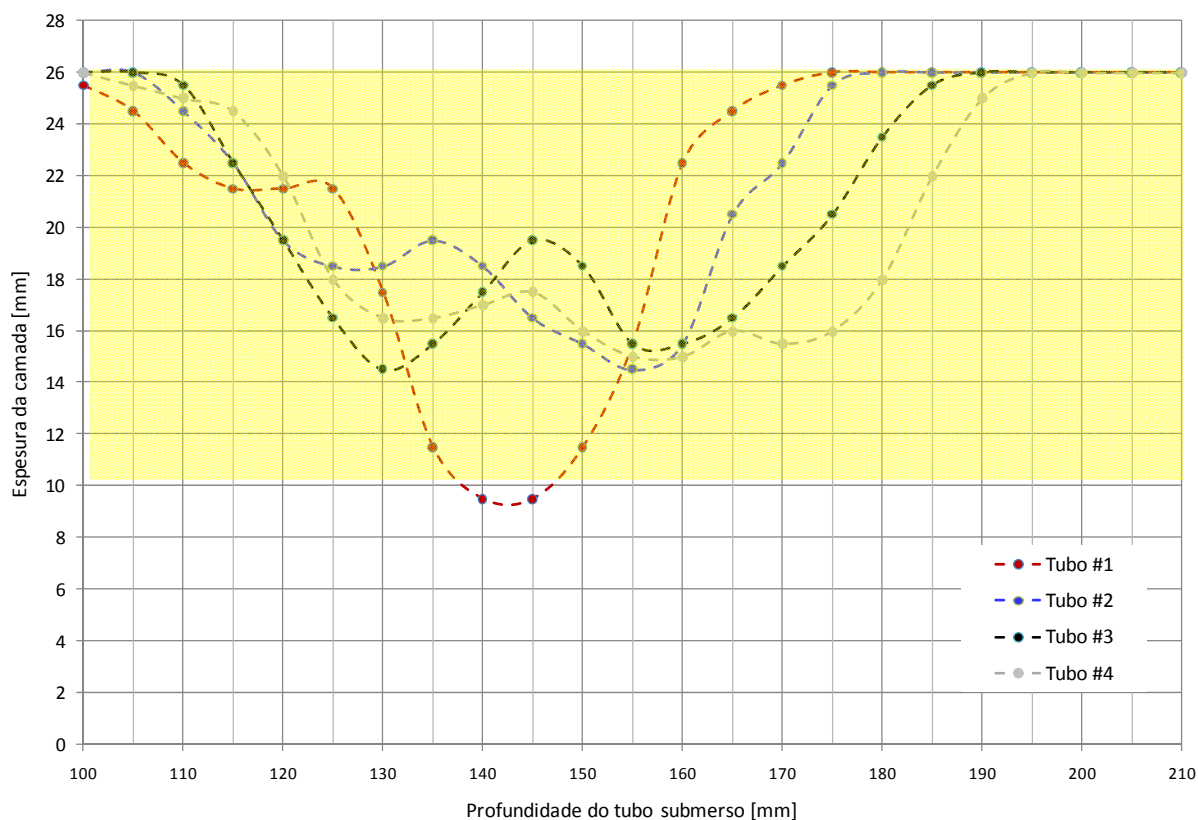


Figura 3. Resultados das medições do desgaste dos quatro tubos submersos analisados.

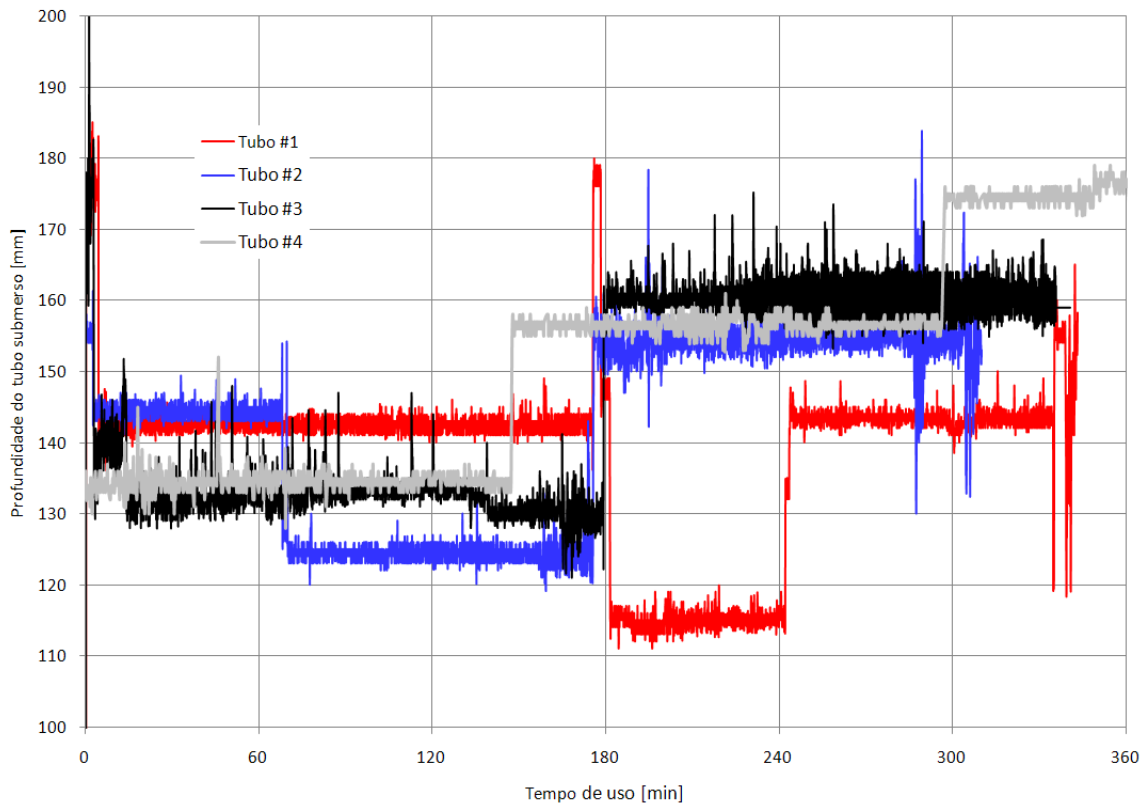


Figura 4. Profundidade de imersão durante a utilização dos quatro tubos submersos analisados.

3 RESULTADOS

3.1 Modelamento do Desgaste

Conforme os trabalhos,^(6,7) o desgaste do tubo submerso é afetado primariamente pela profundidade do tubo submerso. De acordo com esses autores, o desgaste encontrado neste trabalho foi modelado utilizando a seguinte função tipo Gauss:

$$E(x, t) = E_0 - V_D \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{(P_{TS} - x)^2}{P_3}\right) \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde $E(x, t)$ significa a espessura do refratário, E_0 é a espessura inicial antes do uso, x a posição no tubo submerso, V_D a taxa de erosão linear, P_{TS} a profundidade do tubo submerso e t o tempo de contato entre o pó fluxante líquido e o material refratário na posição x . A largura da zona de erosão é descrito com o fator P_3 . A raiz quadrada do fator de P_3 representa a distância entre o valor máximo da erosão, na profundidade de imersão atual P_{TS} e o ponto de inflexão da função tipo Gauss (Figura 5).

Enquanto as variáveis E_0 e P_{TS} são conhecidas, os parâmetros de desgaste do modelo V_D e P_3 têm que ser ajustados através dos dados de medição.

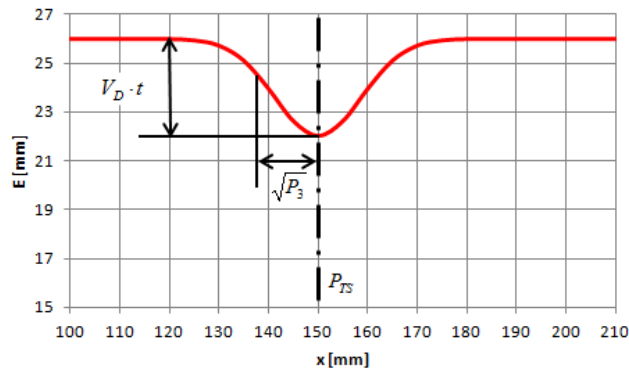


Figura 5. Função do desgaste tipo Gauss.

A Equação 1 foi reescrita em uma forma de tempo e posição discreta para alimentar a profundidade de imersão real ao modelo:

$$E(x_i, t + \Delta t) = E(x_i, t) - V_D \cdot \exp\left(-\frac{(P_{TS} - x_i)^2}{P_3}\right) \cdot \Delta t \quad \text{Eq.(2)}$$

Os quatros históricos da profundidade de imersão reais dos testes foram alimentados, em um programa de simulação, utilizando a Equação 2 para re-simular o desgaste dos Tubos #1 a #4 e ajustar os parâmetros não conhecidos, V_D e P_3 . Os valores dos parâmetros $V_D = 4$ mm/h e $P_3 = 150$ mm² deram a melhor concordância entre os perfis de desgaste medidos e os resultados das simulações. A comparação entre as previsões do modelo e as medições é mostrada na próxima Figura 6.

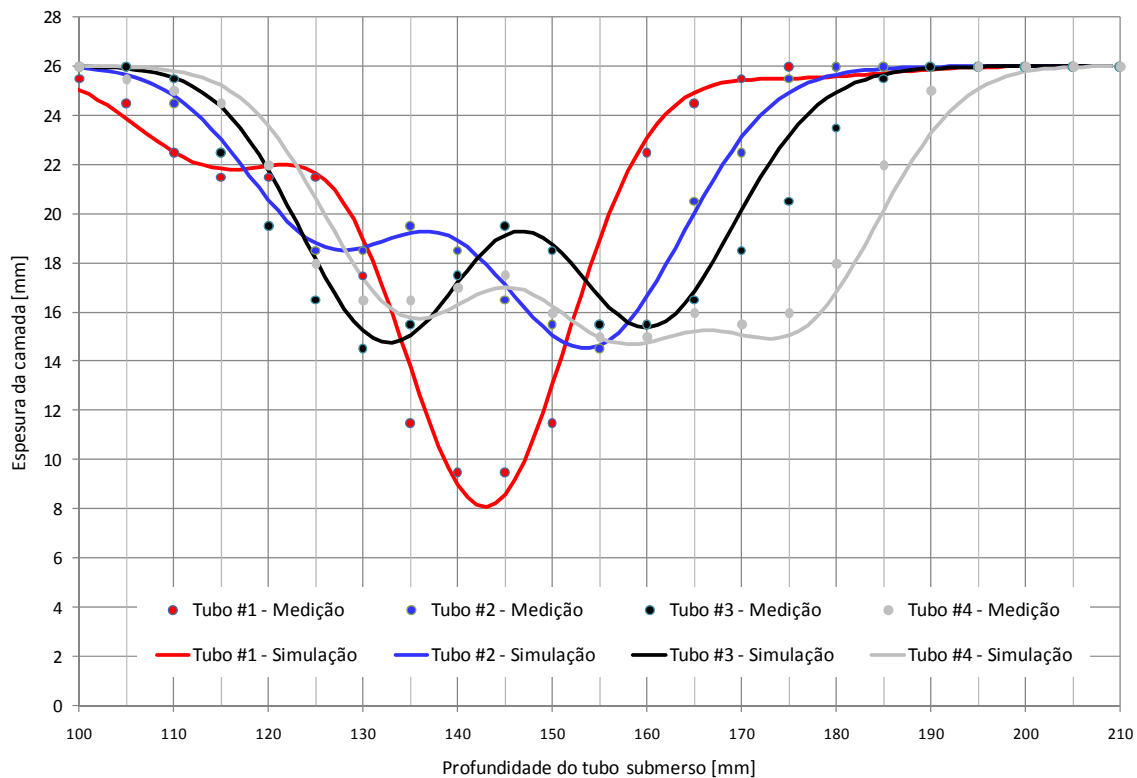


Figura 6. Comparação das medições (pontos) contra as previsões do modelo (linhas). Um acordo muito bom foi atingido usando os parâmetros de modelo $V_D = 4$ mm/h e $P_3 = 150$ mm².

3.2 Monitoramento do Desgaste em Tempo Real

A informação da profundidade de imersão do tubo submerso P_{TS} é enviada, em tempo real, pelo sistema de Nível 1 - PLC (Programmable Logic Controller ou Controlador Lógico Programável) para o modelo e assim o desgaste é calculado em tempo real e é visível aos operadores. Com essa informação *on-line*, os operadores sempre sabem o estado atual do desgaste e podem ajustar a profundidade de imersão, caso a camada de proteção atinja a espessura mínima numa posição. Opcionalmente, eles podem decidir trocar o tubo submerso, se a camada de proteção estiver completamente desgastada. A tela do sistema de monitoramento implementado na máquina de lingotamento 3 em Cubatão é mostrada na Figura 7. Além do desgaste real do tubo (diagrama à direita), o sistema informa ao operador sobre o histórico da profundidade de imersão (diagrama à esquerda). O tempo desde o início do uso, o tempo de uso restante no qual o tubo submerso ainda pode ser utilizado até a espessura mínima da camada protetora de zircônia ser atingida na profundidade de imersão atual. Adicionalmente, não há necessidade de qualquer interação dos operadores, pois o sistema reinicializa o cálculo do desgaste automaticamente, depois de uma troca do tubo submerso.

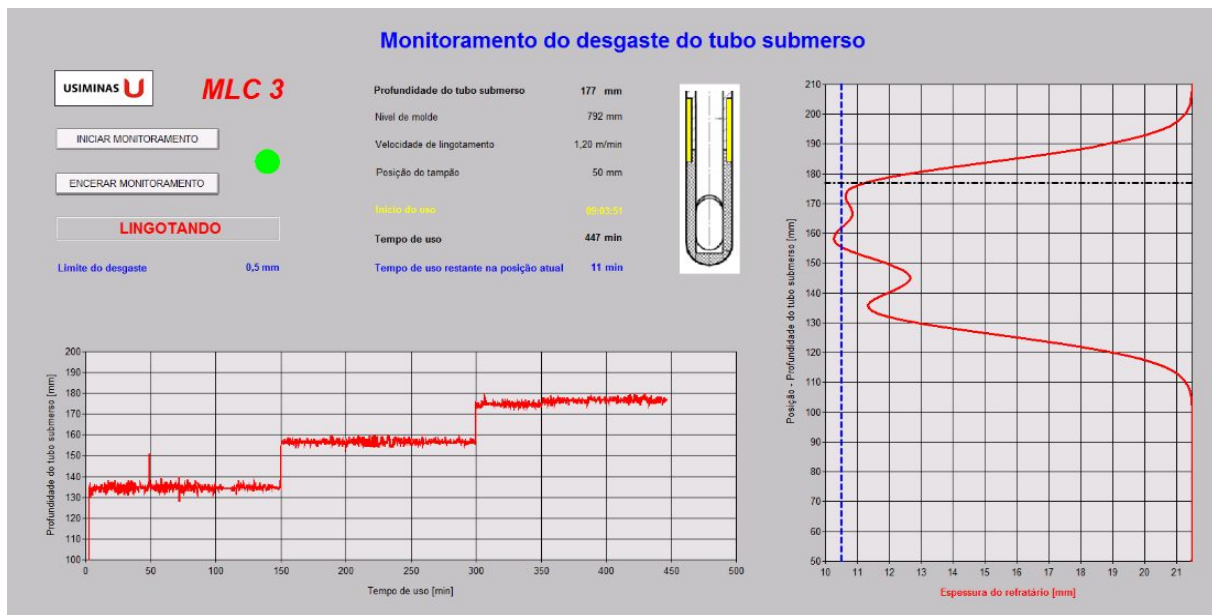


Figura 7. Sistema de monitoramento do desgaste do tubo submerso implementado na máquina de lingotamento 3 em Cubatão.

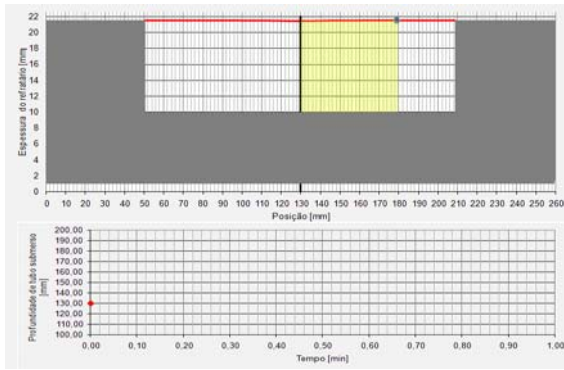
3.3 Otimizador de Desgaste em Tempo Real

O sistema de monitoramento *on-line* do desgaste representa apenas um sistema passivo. O operador ajusta a profundidade de imersão do tubo submerso e pode ver o resultado deste ajuste. Este sistema de monitoramento do desgaste, em tempo real proporciona a base uma otimização do desgaste, em tempo real baseado no cálculo deste sistema de monitoramento *on-line*. Com isso, é possível usar a informação do desgaste, em tempo real, para controlar automaticamente a profundidade de imersão do tubo submerso a fim de otimizar o desgaste sem a interação do operador.

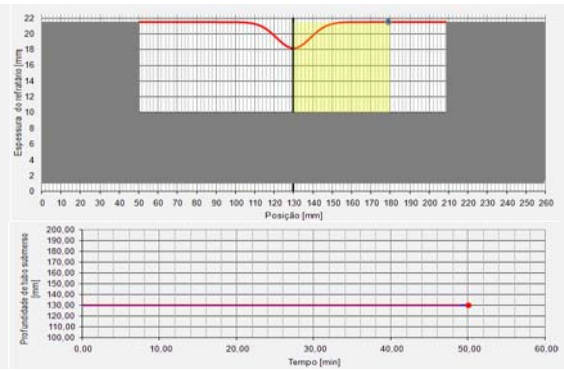
Um algoritmo, que usa a informação do desgaste do tubo atual, foi elaborado para otimizar o desgaste em tempo real. As etapas principais deste algoritmo são:

- o cálculo do desgaste é inicializado (desgaste e tempo de uso igual a zero) automaticamente quando um novo tubo submerso é montado na máquina de lingotamento;
- o modelo de desgaste é atualizado continuamente em intervalos de tempo fixos, pela profundidade de imersão real. Também é verificado se o desgaste está no limite. Nessa subetapa, se for considerado que o desgaste está no limite, o tubo submerso deve ser trocado. Com a montagem de um novo tubo, o processo é reiniciado a partir da primeira subetapa;
- a profundidade de imersão é calculada utilizando a informação dos sensores de posição dos cilindros de ajuste de altura do distribuidor e o sinal do nível do aço no molde;
- o algoritmo procura a profundidade de imersão da maior espessura da camada protetora calculada em tempo real entre o valor máximo e mínimo, (faixa de operação) da profundidade de imersão (por exemplo: entre 130 mm e 170 mm);
- a mudança da profundidade de imersão atual para a nova profundidade é feita gradativamente (2 mm a 10 mm a cada 1 min. a 5 min.) através de comandos fornecidos pelo PLC para as válvulas hidráulicas que atuam nos cilindros hidráulicos do distribuidor (mudança da posição física do distribuidor) ou pelo ajuste do nível do molde pelo controlador do nível do aço no molde. O algoritmo fornece um valor desejado (setpoint) da profundidade de imersão do tubo submerso ao PLC, que executa as mudanças físicas necessárias; e
- depois do movimento gradativo para a profundidade de imersão nova, esta profundidade de imersão é mantida por um tempo determinado. Este tempo é calculado utilizando o valor recíproco da espessura da camada protetora do tubo submerso nesta posição. Depois deste tempo, o algoritmo procura mais uma vez a profundidade de imersão da maior espessura da camada protetora.

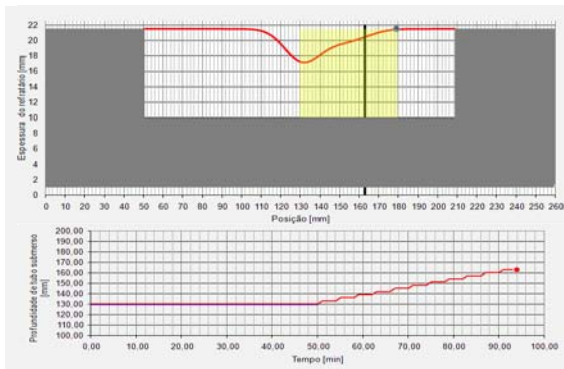
O funcionamento do algoritmo é mostrado, passo a passo na Figura 8, através de um exemplo de simulação. Como resultado, o desgaste do tubo submerso é sempre otimizado, mesmo que o operador tenha usado o tubo submerso no modo manual durante algum tempo. O tempo do uso total também não depende mais da profundidade inicial. Este sistema pode ser implementado em qualquer máquina de lingotamento que fornece um sinal da profundidade do tubo submerso em tempo real e possui ajuste da profundidade de imersão do tubo submerso pelo PLC. Conforme o exemplo de simulação na Figura 8, o tempo de uso total de 8 horas, considerando uma faixa de operação da profundidade do tubo submerso entre 130 mm e 180 mm. A comparação deste resultado, com a prática de operação atual, utilização o tubo em duas linhas de desgaste de 3 horas, mostra que o tempo de utilização total pode ser aumentado até 30%.



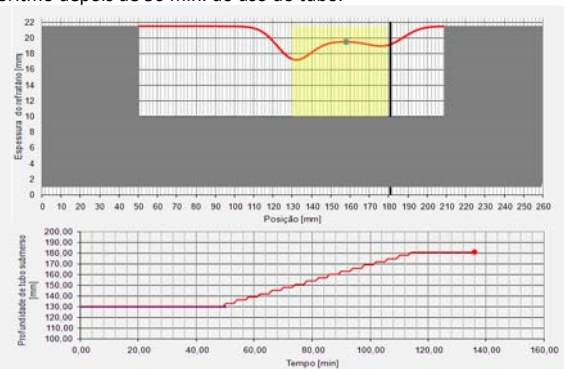
Desgaste do tubo submerso inicializado.



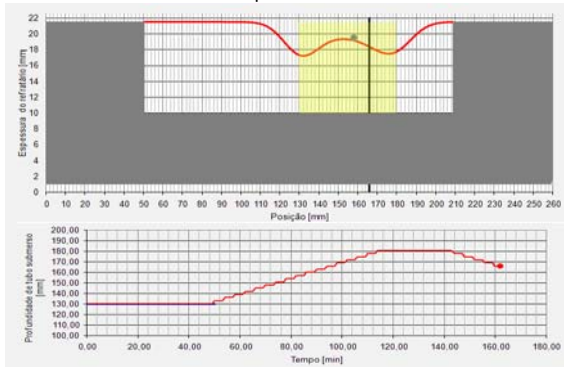
Profundidade de imersão do tubo submerso com a maior espessura de refratário dentro da faixa de operação (amarelo). Profundidade de imersão do tubo submerso (150 mm) antes de ligar o algoritmo depois de 50 min. do uso do tubo.



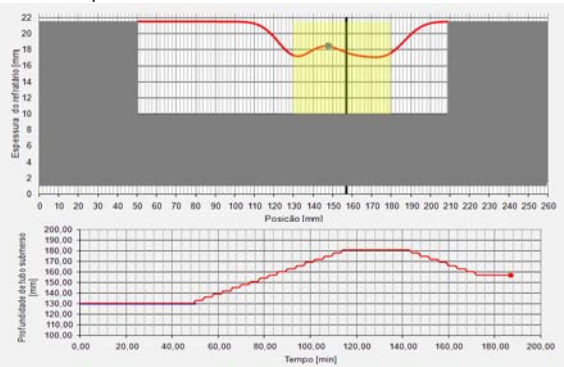
Profundidade de imersão do tubo submerso com a maior espessura de refratário dentro da faixa de operação (amarelo) na posição de 180 mm. Movimento do tubo submerso à profundidade de imersão de 180 mm.



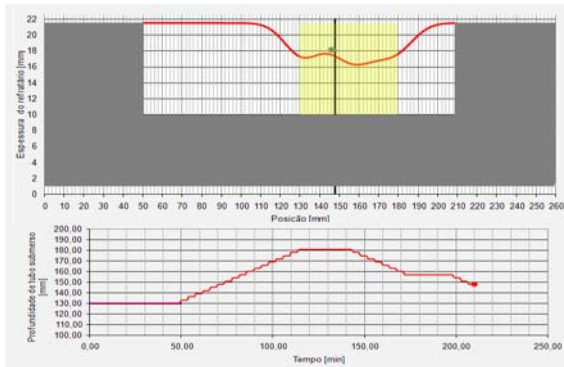
Profundidade de imersão do tubo submerso com a maior espessura de refratário de 158 mm. Esperando na profundidade de 180 mm.



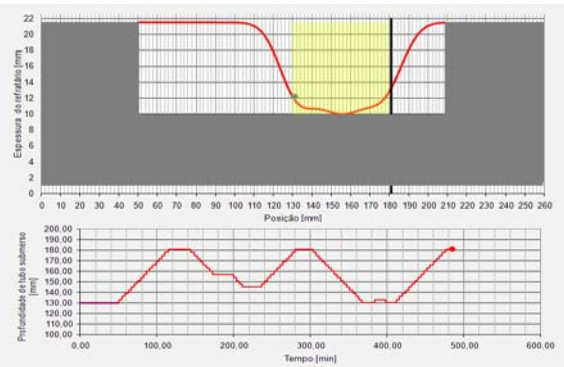
Movimento do tubo submerso à profundidade de imersão de 158 mm. Profundidade de imersão do tubo submerso com a maior espessura de refratário de 148 mm.



Esperando na profundidade de 158 mm.



Movimento do tubo submerso à profundidade de imersão de 148 mm.



Resultado final da sequência.

Figura 8. Funcionamento do algoritmo mostrado pelos vários passos de simulação.

4 DISCUSSÃO

A base da precisão do sistema de monitoramento on-line do desgaste e o otimizador de desgaste em tempo real são os parâmetros do modelo (a taxa linear de corrosão V_D e o parâmetro de largura da corrosão P_3). Neste trabalho são mostrados apenas os resultados de uma configuração dos vários testes feitos. Para oferecer uma visão mais ampla, a taxa de corrosão linear obtida de 4 mm/h é comparada com os resultados disponíveis na literatura.^(3,6,7)

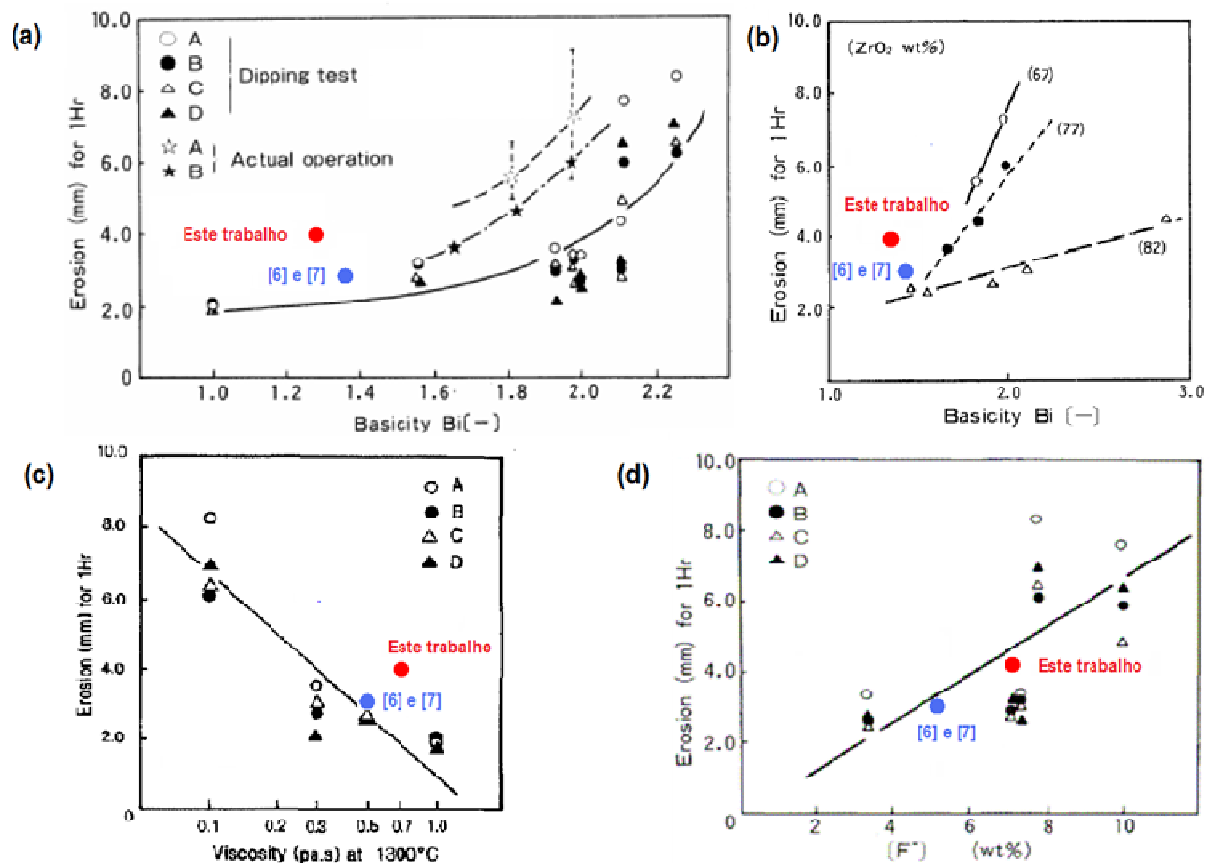


Figura 9. A comparação da taxa de erosão do V_D deste trabalho com os valores na literatura.^(3,6,7) Taxa de erosão V_D em função da basicidade (a) e (b), viscosidade (c), teor de flúor (d) do pó fluxante e do teor de zircônia da camada protetora (b).

A Figura 9 mostra que embora o pó fluxante utilizado tenha basicidade menor e uma viscosidade maior em comparação aos encontrados em outros trabalhos,^(6,7) a taxa de erosão obtida nas medições atuais é maior. Dessa forma, de acordo com os diagramas das Figuras 9a, 9b e 9c, os resultados não correspondem a um comportamento do desgaste mostrado na literatura, mas há uma correspondência, muito boa, da taxa de erosão com o conteúdo de flúor do pó fluxante. Os resultados obtidos condizem com os resultados da literatura^(3,6,7) e mostram que, em nosso caso, a variável do desgaste do tubo submerso dominante é o teor de flúor do pó fluxante. Como um resultado prático, podemos concluir que a taxa de erosão [mm/h] pode ser calculada aproximadamente dividindo o teor de flúor do pó fluxante utilizado [%] por dois.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, o desgaste de vários tubos submersos foi analisado através da medição do perfil de desgaste deles. Os resultados mostraram que a taxa de flúor do pó fluxante, utilizado durante os testes, tem concordância com a literatura apresentada, um grande impacto na taxa de erosão. Os resultados das medições foram utilizados para ajustar os parâmetros de um modelo matemático do desgaste. Este modelo foi implementado num sistema de monitoramento online, para informar aos operadores em tempo real, sobre o estado atual do desgaste do tubo submerso. É possível também usar esta informação do desgaste em tempo real para otimizar o desgaste do tubo submerso, através de um algoritmo sem intervenção do operador, mesmo que o operador tenha usado o tubo submerso no modo manual durante algum tempo. Com a aplicação deste desenvolvimento apresentado, testes preliminares mostraram que, o tempo de uso dos tubos submersos pode ser aumentado até 30% e, no mesmo tempo, quebras dos tubos submersos, com todas as consequências da segurança não desejadas, podem ser reduzidas para o mínimo possível.

Por se tratar de uma nova tecnologia, que demandou atividade inventiva em seu desenvolvimento e com potencial para comercialização, foi solicitada a proteção legal através de patente.

REFERÊNCIAS

- 1 MUKAI K. et al. A Mechanism for the Local Corrosion of Immersion Nozzles. ISIJ Int., v.29, n.6, p.469-476, jun. 1989
- 2 DICK A. F.; YU X.; POMFRET R. J.; COLE K. S. Attack of Submerged Entry Nozzles by Mould Flux and Dissolution of Refractory Oxides in the Flux. ISIJ Int., v.37, n.2, p.102-108, fev. 1997
- 3 NAKAMURA Y. et al. Effect of Chemical Composition of Mold Powder on the of Submerged Nozzles for Continuous Casting of Steel. Trans. ISIJ, v.26, p.1052-1058, 1986
- 4 BRUCE D.; HUNTER N. Utilization of Mould Thermal Monitoring for Improvement of Bloom Surface Quality on the British Steel, Teesside Works 8-Strand. Bloom Caster. In: European Continuous Casting Conference, 2., 1994, Düsseldorf, Alemanha, Anais... Düsseldorf: VDEh, 2000. p.156-161
- 5 HÖFFKEN E.; LAX H.; E PIETZKO G. Development of Improved Immersion Nozzles for Continuous Slab Casting. In: Int. Conf. on Continuous Casting, 4., 1988, Bruxelas, Bélgica, Anais... Bruxelas: Stahl Eisen, 1988. v.2, p.461-473
- 6 CAPURRO C. et al. Characterization of Wear of Submerged Entry Nozzles Used in the Continuous Casting of Steel. In: Steelmaking Conference, 5., 2005, San Nicolas, Argentina, Anais... San Nicolas: IAS, 2005. p.591-601
- 7 CAPURRO C. et al. Optimization of submerged entry nozzles wearing. In: European Continuous Casting Conference, 6., 2008, Riccione, Itália, Anais... Riccione: AIM, 2008.