

AUMENTO DE PERFORMANCE DE VÁLVULAS SUBMERSAS PARA LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS¹

Alessandro Prenazzi²
José Geraldo Ferreira do Nascimento³
Ramon Fraga Resende³

Resumo

O Lingotamento Contínuo vem se desenvolvendo em busca de redução de custo e aumento de produtividade. Nesse aspecto o sequencial médio do Lingotamento Contínuo tem papel importante. Com isso existe uma demanda cada vez maior por válvulas submersas capazes de suportar maiores tempos e velocidades de lingotamento, garantir melhor qualidade para o produto final, estabilidade e segurança operacional. Aliar todas essas características em um produto refratário torna-se um desafio comum a todo processo de Lingotamento Contínuo. Na etapa de projeto conceitual de uma válvula submersa, faz-se necessário o levantamento de informações da máquina de lingotamento na qual ela será utilizada para que a geometria e os materiais empregados sejam condizentes com as condições operacionais. Para o correto dimensionamento da peça, a simulação numérica do fluxo de aço no molde economiza tempo e aumenta a segurança operacional durante o lingotamento. Já para a escolha dos materiais, a composição química dos aços produzidos e do pó fluxante utilizado são essenciais. Este trabalho visa apresentar os resultados obtidos durante o desenvolvimento de uma nova configuração de válvula submersa tanto no formato como nos materiais. Essa nova configuração possibilitou o aumento de performance das válvulas submersas, reduzindo o consumo de peças e o rendimento metálico no Lingotamento Contínuo.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Válvula submersa; Desgaste.

SES PERFORMANCE INCREASE FOR SLAB CONTINUOUS CASTING

Abstract

The continuous casting development is aiming at cost reduction and productivity increase. For this, the sequence time of the continuous casting has a major role. Thus, there is a high demand for SES able to resist higher times and speeds of casting, guarantying better quality for the final product, operational stability and safety. To combine all these characteristics in a single refractory product is a challenge in all continuous casting processes. During the conceptual design of a SES, it is necessary to get some information of the continuous casting machine that it will be used on in order to the geometry and materials would be consistent to the operation condition. For the correct design of the SES, numerical simulation of the steel flow in the mould saves time and increases the operational safety. Besides, for the material choose the chemical composition of the steels and of the mould powders used is essential. This technical paper aims to present the obtained results during the development of a new SES configuration in the geometry and in the materials. This new configuration allowed the increase of performance, reducing the pieces consumption and the metallic yield of the continuous casting.

Key words: Continuous casting; SES; Wear.

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

² *Assistente Técnico Especialista em Lingotamento Contínuo, Magnesita Refratários S.A., Contagem, MG, Brasil.*

³ *Assistente Técnico de Lingotamento Contínuo, Magnesita Refratários S.A., Contagem, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O Lingotamento Contínuo desenvolve-se em busca de produtos de maior de qualidade. Entretanto, a redução de custo e aumento de produtividade vem sendo cada vez mais importantes. Nesse aspecto a estabilidade do processo e o sequencial médio do Lingotamento Contínuo têm papel importante. A correta especificação dos refratários empregados no processo é fundamental para atingir esses objetivos. Com isso, existe uma demanda cada vez maior por válvulas submersas capazes de suportar maiores tempos de lingotamento, garantir melhor qualidade para o produto final bem como a estabilidade e segurança operacional. Aliar todas essas características em um produto refratário torna-se um desafio comum no processo de Lingotamento Contínuo.

Dois aspectos são essenciais na busca por aumento de performance de uma válvula submersa: a resistência ao ataque pela escória de fluxante e a tecnologia *anti-clogging*, pois ambos permitem sequenciais longos sem prejudicar a estabilidade operacional.

Este trabalho visa apresentar os resultados obtidos durante teste industrial para o desenvolvimento de uma nova configuração de válvula submersa tanto no formato como nos materiais. Essa nova configuração possibilitou aumento de performance, reduzindo o consumo de peças e o rendimento metálico no Lingotamento Contínuo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dimensionamento do Canal

A primeira etapa do projeto de uma válvula submersa é o cálculo do diâmetro de canal interno necessário para garantir a operação da MLC com segurança, sem prejuízo à produtividade. A metodologia empregada para o cálculo é através da Equação 1. Os dados de entrada encontram-se Tabela 1.

$$G = \rho * k * \frac{\pi D^2}{4} * (2gh)^{1/2} * 60 \quad (1)$$

Tabela 1. Dados de entrada para dimensionamento do canal

Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Velocidade de lingotamento máxima	V	1,10	m/min
Largura da placa	L	2,000	m
Espessura da placa	t	0,250	m
Densidade	ρ	7,0	t/m ³
Vazão mássica máxima	G	3,85	t/min
Fator de segurança	k	X*	-
Aceleração da gravidade	g	9,8	m/s ²

*A constante K da equação 1 é um fator de segurança utilizado que varia de acordo com cada tecnologia de material utilizado.

Considerando a vazão mássica máxima de 3,85 t/min, foram realizados cálculos dos diâmetros internos de canal de válvula submersa necessários para o escoamento de aço, de acordo com a altura da coluna de aço líquido no distribuidor (Tabela 2). O diâmetro mínimo necessário para atender à vazão máxima com coluna de aço de 0,2 m seria 81 mm.

Tabela 2. Diâmetro calculado para uma vazão fixa

Nível de aço h (m)	D calculado (mm)
1,2	52
1,1	53
1	54
0,9	56
0,8	57
0,7	59
0,6	61
0,5	64
0,4	68
0,3	73
0,2	81

Entretanto, de acordo com o padrão operacional, a velocidade de lingotamento é gradativamente reduzida à medida que se reduz o nível de aço do distribuidor, prática comum devido principalmente ao risco de passagem de escória para o molde. A Tabela 3 apresenta um padrão e os diâmetros recalculados de acordo com a redução de velocidade/vazão. Percebe-se que o diâmetro mínimo necessário é reduzido para 61 mm com coluna de aço de 0,6 m, que é o menor valor no qual se opera com velocidade máxima.

Tabela 3. Diâmetro calculado com redução de vazão conforme padrão operacional

Nível de aço (m)	Peso (t)	Velocidade de lingotamento (m/min)	Vazão (t/min)	D calculado (mm)
0,9	30	1,1	3,85	56
0,8	26	1,1	3,85	57
0,7	22	1,1	3,85	59
0,6	18	1,1	3,85	61
0,5	14	0,8	2,80	55
0,4	12	0,8	2,80	58
0,3	10	0,6	2,10	54
0,2	5	0,1	0,35	24

A análise do efeito do acúmulo de *clogging* no interior da válvula submersa, provocando o estrangulamento do canal é fundamental para a garantia da estabilidade do lingotamento. Essa análise foi feita para os diâmetros de 70 mm e 75 mm. Variou-se a espessura total de *clogging* no diâmetro de 0 a 7,5 mm e calculou-se a abertura linear (considerando canais circulares) que pode ser entendida com a “taxa de ocupação” do diâmetro com *clogging* em relação ao diâmetro necessário para atender à vazão. Na Tabela 4, são mostrados os resultados desta análise, indicando que mesmo para o diâmetro reduzido proposto, o valor não ultrapassa a capacidade do canal (100%) para nenhum nível de aço no distribuidor, confirmando a adequação desse diâmetro às condições operacionais. Definiu-se, portanto, duas configurações diferentes de diâmetros para teste: 70 mm e 75 mm.

Tabela 4. Taxa de ocupação e efeito do *clogging*

			Diâmetro (mm)				70,0	Diâmetro (mm)				75,0
			Espessura total de <i>clogging</i> (mm)									
			0	2,5	5	7,5	0	2,5	5	7,5		
Nível de aço (m)	Vazão (t/min)	D calculado (mm)	Diâmetro com <i>clogging</i> (mm)				Diâmetro com <i>clogging</i> (mm)					
			70,00	67,50	65,00	62,50	75,00	72,50	70,00	67,50		
1,1	3,85	53	57%	61%	66%	71%	50%	53%	57%	61%		
1	3,85	54	60%	64%	69%	75%	52%	56%	60%	64%		
0,7	3,85	59	71%	77%	83%	90%	62%	67%	71%	77%		
0,5	2,80	55	61%	66%	71%	77%	54%	57%	61%	66%		
0,3	2,10	54	60%	64%	69%	75%	52%	55%	60%	64%		
0,2	0,35	24	12%	13%	14%	15%	11%	11%	12%	13%		

2.2 Simulação Numérica

Após a definição dos diâmetros a serem testados, partiu-se para a próxima etapa do projeto de uma válvula submersa: a simulação numérica através de modelos computacionais do fluxo de aço no molde utilizando o software CFX, que permite conhecer as influências de alterações no design dos materiais refratários nas condições de processo e quesitos de qualidade do produto final. Os dados de entrada dos modelos estão apresentados na Tabela 1.

As Figuras 1 e 2 mostram os vetores de velocidade do fluxo de aço no plano central da maior dimensão do molde. É possível observar que a válvula de menor diâmetro apresenta maior velocidade no canal como era esperado. Essa característica reduz a camada limite de escoamento e conseqüentemente a deposição de inclusões (*clogging*). A *teoria da camada limite* de Singh de 1974 é citada por Cramb⁽¹⁾ e por Ogibayashi.⁽²⁾ Um fluido passando por um canal tende a ter a velocidade reduzida nas camadas próximas às paredes devido às forças de fricção. As inclusões que passam por essa camada limite não se movem devido à velocidade próxima de zero do líquido. Nesse momento, as inclusões aderem ao refratário, ocorrendo sinterização em temperaturas da ordem de 1.540°C. Além disso, o estudo mostra que aumenta a velocidade com que o jato atinge a face estreita na condição analisada (maior vazão), o que deve ser um ponto de atenção na análise de resultados de qualidade.

Nas Figuras 3 e 4 são mostrados os resultados obtidos de energia cinética de turbulência no menisco que é indicativo de possibilidade de arraste de escória e em outro sentido, a ocorrência de solidificação parcial do menisco por baixa troca térmica. Os resultados indicam que a configuração de 75 mm tem maior tendência de arraste de escória e que a configuração de 70 mm proporciona uma energia cinética menor e mais distribuída pelo menisco, sem regiões de volume morto.

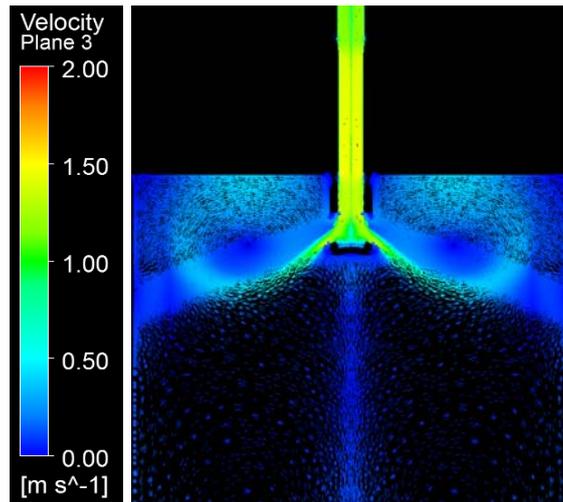


Figura 1. Caso 1 - 75 mm. Vetores de velocidade plano central - 75 mm.

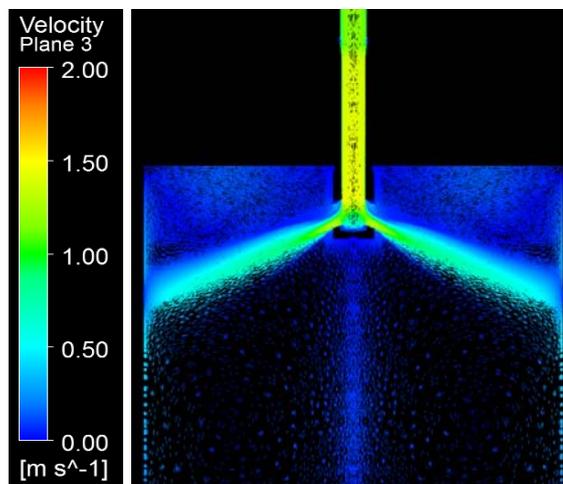


Figura 2. Caso 2 - 70 mm Vetores de velocidade plano central - 70 mm.

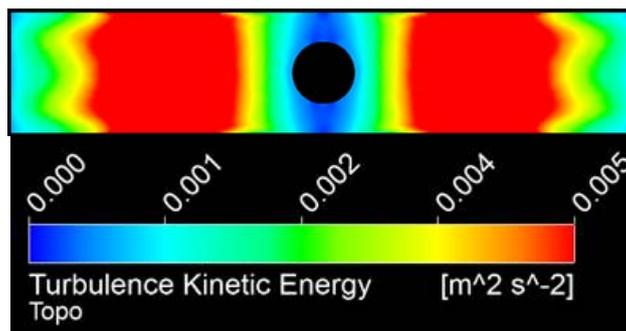


Figura 3. Energia cinética de turbulência - 75 mm.

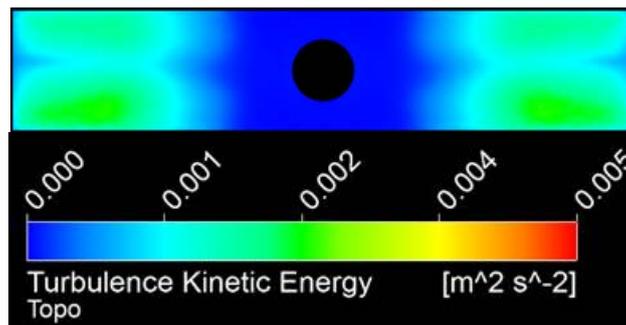


Figura 4. Energia cinética de turbulência - 75 mm.

2.3 Tecnologias *Anti-Clogging*

Foram realizados testes com duas tecnologias visando à redução de formação de *clogging*, que é uma importante causa da troca prematura de válvulas submersas durante o lingotamento. A utilização de material livre de carbono, denominado *carbon less*, e a injeção de argônio através de massa porosa foram selecionadas para teste.

2.3.1 Material *carbon less*

A região do canal interno da válvula é revestida com material sem adição de carbono em sua composição. Esse material foi desenvolvido no intuito de reduzir o acúmulo de alumina de formação *in situ* nas paredes refratárias. A oxidação do carbono presente no refratário forma CO e SiO gasosos (Equações 2, 3 e 4) que reagem com o alumínio dissolvido no aço gerando alumina e revertendo Si para o banho (Equações 5 e 6). Com o uso do *carbon less* a formação de CO gasoso é eliminada e consequentemente o acúmulo de alumina nas paredes refratárias e o *pick up* de C e Si pelo aço. O mecanismo de formação da camada de alumina é ilustrado na Figura 5.⁽³⁾

Reduzindo a formação de alumina *in situ*, retarda-se também o aumento da rugosidade das paredes refratárias que aumenta a camada limite do escoamento e consequentemente a deposição da alumina presente no aço onde acontece a deposição de partículas não metálicas.

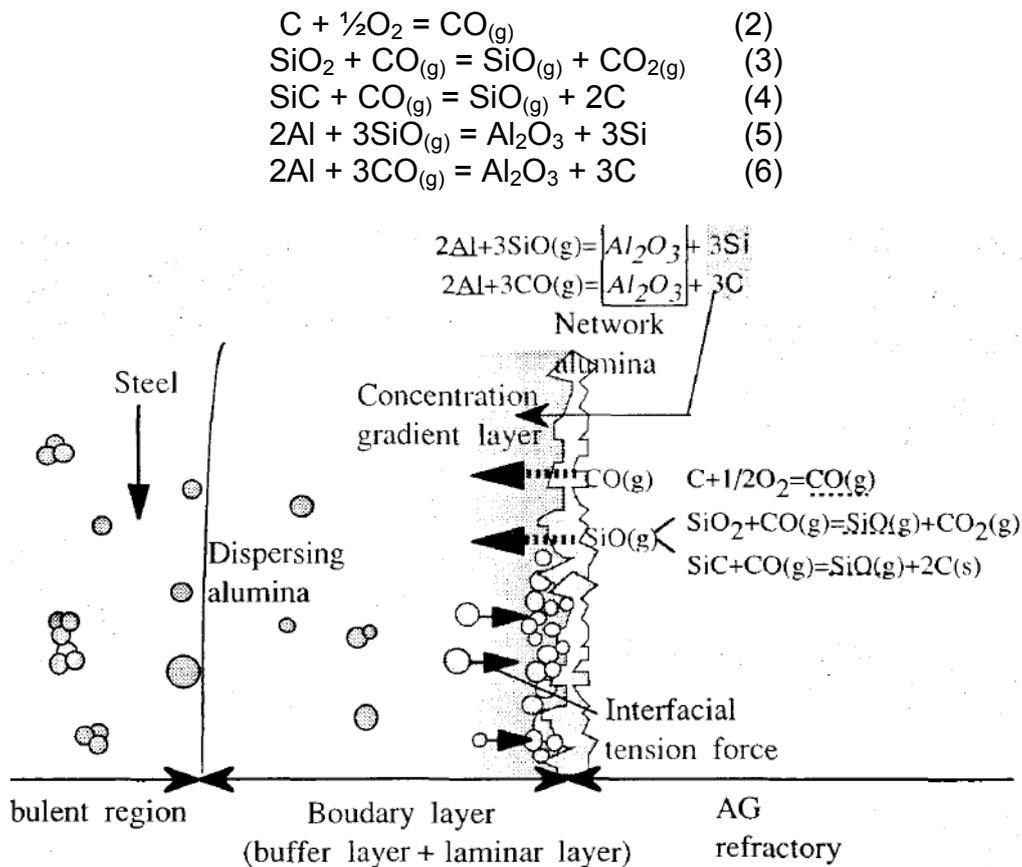


Figura 5. Interação aço refratário.⁽³⁾

2.3.2 Injeção de argônio

A prática de injeção de argônio é um mecanismo amplamente utilizado em várias etapas da produção de aço. A injeção através da válvula submersa produz bolhas de pequeno diâmetro que impedem o contato entre as partículas não metálicas e as paredes refratárias reduzindo a formação do *clogging*.⁽⁴⁾ Além disso, as bolhas de menor diâmetro aumentam a flotação das inclusões no molde e melhora a distribuição térmica no menisco.

Cabe ressaltar que o processo de fabricação dessas peças é complexo com matérias primas de características específicas, sendo importante sua inspeção por raios-X uma etapa essencial para o fornecimento dessas peças.

2.4 Finger Test

Além do *clogging*, outra característica importante na definição do desempenho da válvula submersa é o ataque pela escória de pó fluxante. Para análise da resistência do material refratário ao desgaste por corrosão, foi empregado o *finger test*, que visa determinar o melhor material refratário para cada característica de escória utilizada no lingotamento contínuo.

O teste consiste em mergulhar corpos de prova de diferentes materiais utilizados na linha de escória de válvula submersa em banho de aço líquido coberto por pó fluxante em um forno de indução (Figura 6) a uma temperatura de 1.600°C. Ao final do teste, com o tempo de contato com a escória e a espessura residual do corpo de prova (Figura 7), é possível calcular a velocidade de desgaste do material e assim estimar a expectativa de vida das peças durante o lingotamento.



Figura 6. Imersão no forno de indução.

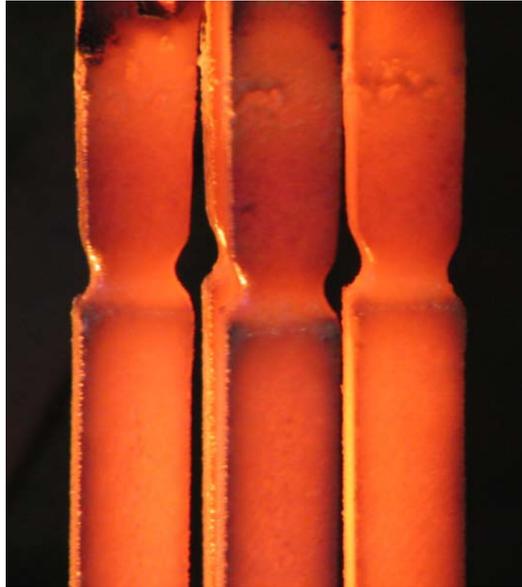


Figura 7. Corpos de prova após do teste.

Os materiais testados possuem entre 70% e 85% de ZrO_2 em sua composição. A escolha do melhor material depende também das condições operacionais como a prática do pré-aquecimento utilizada. Além dos teores de ZrO_2 , as fontes, grau e mecanismo de estabilização das matérias primas são importantes para o desenvolvimento do melhor material para cada condição operacional. Dentre as condições operacionais que mais afetam o desgaste das válvulas submersas pela escória são a velocidade de lingotamento e práticas de injeção de argônio utilizadas.

2.5 Projetos Refratários

Como exposto anteriormente, foram escolhidos dois diâmetros de canal e duas tecnologias *anti-clogging* para realização de testes, resultando em quatro projetos diferentes de válvulas submersas apresentados na Figura 8.

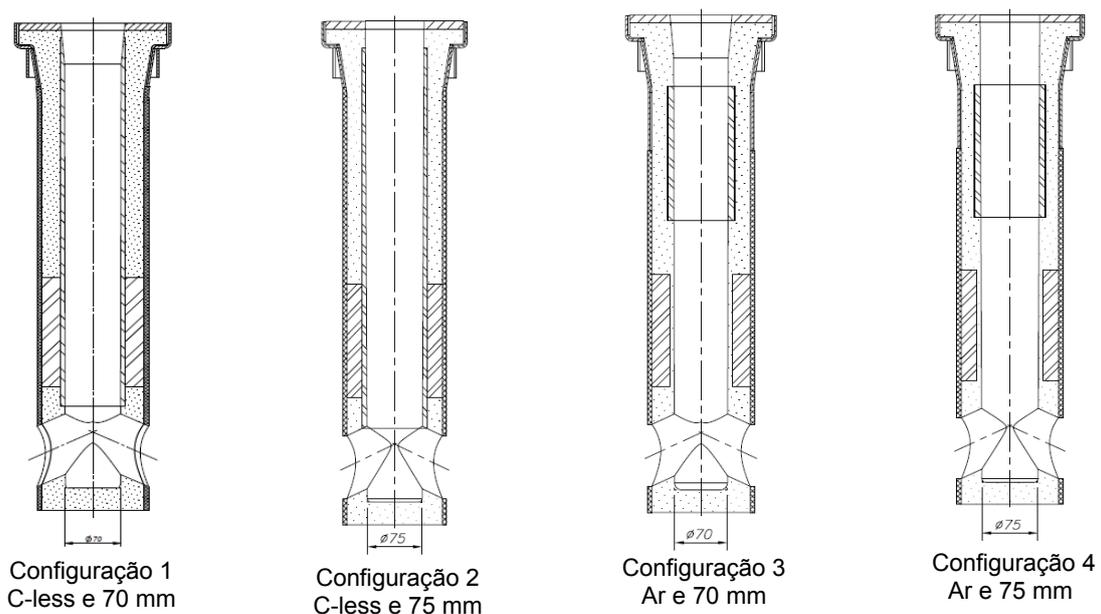


Figura 8. Projetos de válvulas submersas.

2.6 Determinação da Expectativa de Vida

Ao final de cada teste, as válvulas (Figura 12) eram inspecionadas medindo os diâmetros residuais (Figura 13) de cada linha de escória. E, através das Equações 7 e 8, foi possível calcular a expectativa de vida por linha de escória.

$$V = \frac{D_i * N_{LE} - (D_1 + D_2 + D_3)}{2 * t} \quad (7)$$

Onde: V é velocidade de desgaste, D_i é diâmetro inicial, N_{LE} é o número de linhas de escória, D_x são os diâmetros residuais e t é o tempo de operação.

$$EV_{LE} = \frac{\frac{(D_i - D_c)}{2} - t_s}{V} \quad (8)$$

Onde: EV_{LE} é expectativa de vida por linha de escória, D_i é diâmetro inicial, D_c é diâmetro do canal, t_s é o remanescente de segurança e V é velocidade de desgaste.

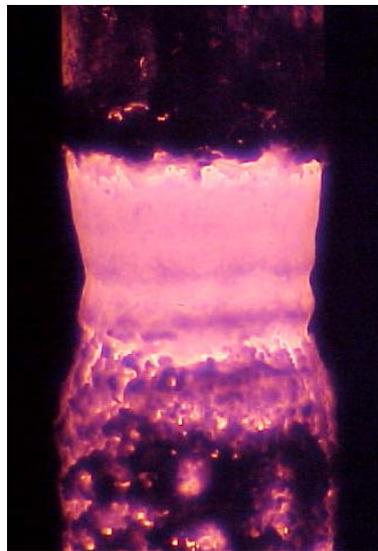


Figura 12. Válvula após operação.

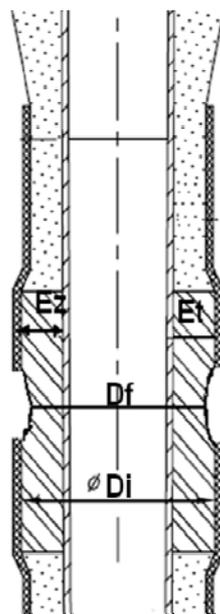


Figura 13. Diâmetros residuais.

3 RESULTADOS

3.1 Geral

Tabela 5. Configuração 1 - C-less e 70 mm

Nº de peças	Vida média	Vida média	Vida máxima	Vida máxima
	1ª válvula	2ª válvula	1ª válvula	2ª válvula
27	263 min	335 min	398 min	335 min
	4 h 23 min	5 h 35 min	6 h 38 min	5 h 35 min

Tabela 6. Configuração 2 - C-less e 75 mm

Nº de peças	Vida média	Vida média	Vida máxima	Vida máxima
	1ª válvula	2ª válvula	1ª válvula	2ª válvula
15	260 min		412 min	
	4 h 20 min		6 h 52 min	

Tabela 7. Configuração 3 – Injeção de Ar e 70 mm

Nº de peças	Vida média	Vida média	Vida máxima	Vida máxima
	1ª válvula	2ª válvula	1ª válvula	2ª válvula
17	242	200	371 min	356 min
	4 h 02 min	3 h 20 min	6 h 11 min	5 h 56 min

Tabela 8. Configuração 4 – Injeção de Ar e 75 mm

Nº de peças	Vida média	Vida média	Vida máxima	Vida máxima
	1ª válvula	2ª válvula	1ª válvula	2ª válvula
15	295	97	489 min	97
	4 h 55 min	1 h 37 min	8 h 09 min	1 h 37 min

3.2 Anti-Clogging

Dentre as tecnologias testadas a injeção de argônio mostrou maior eficiência na redução da deposição de partículas não metálicas nas paredes refratárias (Figura 14). Não foi possível observar alterações significativas na deposição de inclusões quando se utilizou o material *C-less*. Entretanto, devido a facilidades operacionais e ao fato de não se ter realizado nenhuma troca prematura por *clogging* da válvula com material *carbon less*, esta configuração mostrou-se mais adequada às condições operacionais de lingotamento.



Figura 14. Redução de acúmulo de *clogging* devido à injeção de argônio.

3.3 Expectativa de Vida

As Tabelas 9 e 10 apresentam as expectativas de vida obtidas para cada configuração de diâmetro para cada tipo de aço, além do padrão em vigência de tempo de operação por linha de escória. Para os cálculos, foram utilizados os maiores valores de taxa de desgaste encontrados.

Tabela 9. Tempo / LE - canal de 75 mm

Tipo de aço	MRSA	Padrão operacional	% de aumento
Aços AC, BC e UBC	190 min/LE	150 min/LE	27%
Aços MC	210 min/LE	180 min/LE	17%

Tabela 10. Tempo / LE - canal de 70 mm

Tipo de aço	MRSA	Padrão operacional	% de aumento
Aços AC, BC e UBC	210 min/LE	150 min/LE	40%
Aços MC	250 n/LE	180 n/LE	38%

4 DISCUSSÃO

Após análise dos resultados de qualidade de 49,7 mil toneladas de produtos laminados foi selecionada a configuração 1 (canal de 70 mm e com material *C-less*) para ser implantada no lingotamento contínuo. Como discutido, operacionalmente foram avaliados os dois principais aspectos que afetam a durabilidade das válvulas submersas que são a ocorrência de *clogging* e o desgaste por corrosão pela escória de pó fluxante.

Em relação ao *clogging*, apesar da configuração com a utilização de injeção de argônio ter apresentado melhores resultados, concluiu-se que mesmo com alguma incidência, a válvula com material *carbon less*, atingiria os objetivos em relação ao aumento do tempo de lingotamento contínuo proposto no início do desenvolvimento. Além disso, os resultados de qualidade obtidos não mostraram nenhuma diferença significativa entre as duas tecnologias *anti-clogging*, de acordo com a avaliação da

aciaria. Entretanto, devido aos bons resultados apresentados pela injeção de argônio, o lingotamento está estudando a possibilidade de se melhorar o sistema atual da injeção para permitir um controle mais restrito de vazões e pressões de injeção.

Contornado a ocorrência do *clogging*, a limitação da vida da válvula submersa pelo desgaste por corrosão pela escória de pó fluxante foi o aspecto abordado. Para aumentar o desempenho do produto em relação ao desgaste, além de se estudar o melhor material, a alteração da geometria com a redução do diâmetro interno em 5 mm contribuiu para esse ganho. O aumento de vida obtido no final do desenvolvimento foi de cerca de 40% sendo que aproximadamente 25% foi devido ao desenvolvimento do novo material e 15% referente à alteração do projeto da peça. O material da linha de escória utilizado foi especialmente desenvolvido realizando testes laboratoriais com o pó fluxante mais agressivo utilizado neste lingotamento obtendo a configuração final de 83% de ZrO_2 , parcialmente estabilizada com Ca.

O resultado final do estudo não se limita à redução do consumo de válvulas submersas, que foi estimado em cerca de 900 peças ano (correspondente a 2,5 meses de consumo). Essa redução de consumo é toda obtida na redução de troca de válvulas submersas durante o lingotamento. Com isso pode-se considerar também a redução na geração de *down grade* por esse motivo como representando cerca de 450 m de placas de primeira qualidade a mais por ano.

Deve-se considerar, também, a maior segurança operacional já que durante o procedimento de troca há riscos inerentes ao processo e a estabilidade do processo, que exige menor número de intervenções, tanto para troca como para alteração da altura do distribuidor (variação da linha de escória).

5 CONCLUSÃO

A metodologia de análise e desenvolvimento apresentada nesse estudo demonstrou-se eficaz e de baixo risco operacional, já que todos os aspectos relativos às alterações realizadas foram analisados. Esta metodologia mostra principalmente que os desenvolvimentos de refratários para o lingotamento são específicos para cada condição de processo e este é o caminho mais eficaz para redução de custo sem interferência negativa na qualidade do produto lingotado.

REFERÊNCIAS

- 1 CRAMB, A. W. Oxides defects, slags and cleanliness control. In: CONTINUOUS CASTING OF STEEL BILLETS, BLOOMS AND SLABS, 2002, Vancouver. Brimacombe Continuous Casting Course. Vancouver: University of British Columbia, 2002. p.C1-H169.
- 2 OGIBAYASHI, S. *Mechanism and countermeasure of alumina buildup on submerged nozzle in continuous casting*. *Taikabutsu Overseas*, Tokyo, v.15, n.1, p.3-13, Mar.1995.
- 3 MATSUI, T.; IKEMOTO, T.; SAWANO, K.; SAWADA, I. *Effects of Carbon and Silica in Submerged Entry Nozzles on Alumina Buildup*. *Taikabutsu Overseas*, Tokyo, v.18, n.1.
- 4 TANCREDO, G.; FAVA, F.; FERREIRA, J.; SAMPAIO, W. SOLUÇÃO INTEGRADA PARA OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇO. Contribuição técnica ao XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, ABM, Vitória, Maio de 2.005.