



Tema: Solidificação / Lingotamento

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DA OSCILAÇÃO DO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO NAS ACIARIAS DA USIMINAS*

Marcelo Moreira Furst Gonçalves¹

Rafael Fernandes Reis²

Geraldo Cesar Dias Belligoli³

Resumo

A qualidade superficial dos produtos lingotados continuamente está ligada diretamente aos estágios iniciais de solidificação do aço no molde. Nessa etapa do processo, os parâmetros e estratégias de oscilação são decisivos para a obtenção de produtos com qualidade superficial adequada. Assim, foi desenvolvido na Usiminas um sistema computadorizado para monitoramento dos parâmetros de oscilação do molde, de modo a fornecer subsídios para um melhor entendimento do processo. Este sistema monitora, em tempo real, o eixo vertical e as oscilações nos eixos horizontal e transversal, mesmo com baixas amplitudes. O sistema desenvolvido possibilita a obtenção dos dados com alta precisão, de forma totalmente automática e a realização de pós-tratamento de forma a se obterem valores relativos ao processo de lingotamento e funcionamento do molde.

Palavras-chave: Oscilação do molde; Lingotamento contínuo; Instrumentação; Medição.

DEVELOPMENT SYSTEM FOR MEASURING THE MOLD OSCILLATION OF CONTINUOUS CASTING AT USIMINAS

Abstract

The surface quality of continuous casted products is directly linked to the initial stages of steel solidification in the mold. In this step process, the oscillation parameters and strategies are crucial for obtaining products with adequate surface quality. Thus was developed in Usiminas a computerized system for monitoring parameters of the mold oscillation so as to provide support for a better understanding the process. The system measure, in real time, the vertical, horizontal and transverse axes displacement, even at low amplitudes. The developed system obtain data with high accuracy and fully automatic, further enabling the realization of post-treatment to obtain amounts related to the operation of casting and molding process.

Keywords: Mold oscillation; Continuous casting; Instrumentation; Measurement.

¹ Engenheiro Eletrônico, Centro de Tecnologia, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Centro de Tecnologia, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Gerência Geral de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

Dentre do processo de lingotamento contínuo, o molde representa uma etapa crítica. A qualidade superficial dos produtos lingotados continuamente está ligada, diretamente, aos estágios iniciais de solidificação do aço no molde. Assim, todos os parâmetros de medição e controle de processos relacionados ao molde são decisivos na obtenção de um produto com qualidade adequada.

O molde de lingotamento é formado por placas de cobre refrigeradas a água, responsáveis pela remoção e dissipação do calor, favorecendo a formação de “pele” de aço solidificada. Nesse estágio do processo, deve-se evitar o colamento do aço e minimizar a fricção entre a placa de cobre do molde e a “pele” em solidificação. Ambas as situações são indesejáveis e podem culminar em problemas de qualidade superficial e acidentes operacionais, tais como, rompimentos de “pele” (*breakout*).

Com o intuito de minimizar as ocorrências destes tipos de problemas é que as máquinas de lingotamento contínuo possuem moldes oscilantes. A oscilação imposta ao molde favorece a infiltração do pó fluxante na interface entre a placa de cobre e a “pele” em solidificação, melhorando a lubrificação e propiciando um melhor controle da transferência de calor [1].

O sistema de oscilação é um complexo conjunto de componentes que sustentam as placas de cobre resfriadas a água. Na maioria dos casos, todo o conjunto, incluindo os rolos de suporte deste segmento, move-se para cima e para baixo durante o processo de produção. Os métodos utilizados para se empregar o movimento ao molde incluem excêntricos, eixos e cilindros hidráulicos. Novos osciladores incorporaram o sistema tipo mola que possibilita a diminuição da massa a ser movimentada abrindo espaço para avançados sistemas servo-hidráulicos de oscilação. Esses são habilitados para modificações nas principais variáveis durante o processo de produção. Adicionalmente, estes novos sistemas podem acarretar menor desgaste e, conseqüentemente, menor custo de manutenção.

A Figura 1 mostra o diagrama esquemático de um sistema de oscilação, composto de um cilindro hidráulico ligado diretamente por uma servo-válvula.

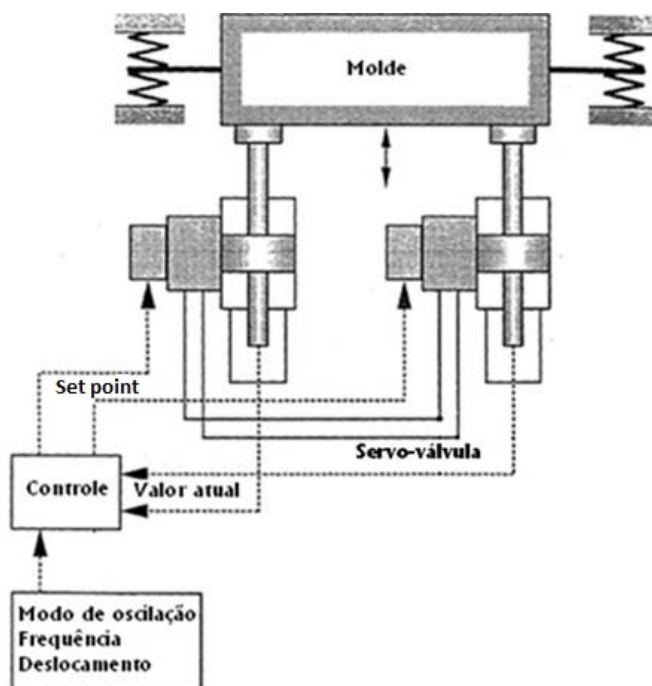


Figura 1. Desenho esquemático do sistema de controle da oscilação.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



No sistema apresentado na Figura 1, os cilindros são integrados com sensores de posição, onde os sinais de saída são comparados continuamente com o *set point* estabelecido. O sistema atua de forma a compensar eventual diferença entre o valor atual e o *set point*, portanto, a posição pode ser controlada como uma função do tempo. O sistema de controle, neste caso, é incorporado a um computador que pode atuar no sincronismo da velocidade dos cilindros, por meio de servo controlador, permitindo ajuste da curva de oscilação, bem como a facilidade de operação.

Os parâmetros de oscilação afetam as condições operacionais do lingotamento contínuo. Eles estão ligados diretamente ao consumo de pó fluxante, à formação do menisco e, por consequência, refletem no fluxo de calor do molde e na formação das marcas de oscilação.

Como a definição das condições de oscilação é um fator importante, foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Usiminas em conjunto com a Gerência Geral de Aciaria da Usina de Ipatinga um sistema computadorizado para monitoramento dos parâmetros de oscilação do molde de modo a fornecer informações sobre o processo e possibilitar o domínio da tecnologia de medição, bem como, o tratamento das informações obtidas. Esse sistema é constituído por acelerômetros, módulos de condicionamento e transmissão dos dados e software de aquisição, processamento, armazenamento e apresentação dos dados obtidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O molde de lingotamento contínuo trabalha com determinadas faixas de frequência e amplitude de oscilação. No caso da Usina de Ipatinga a frequência de operação varia de 0,83 Hz a 2,5 Hz, sendo que a amplitude mais comum está na faixa de 3 mm. Assim, para a obtenção destes deslocamentos nesta faixa de frequência, foram utilizados acelerômetros de alto desempenho em baixas frequências cujo esquema é apresentado na Figura 2.

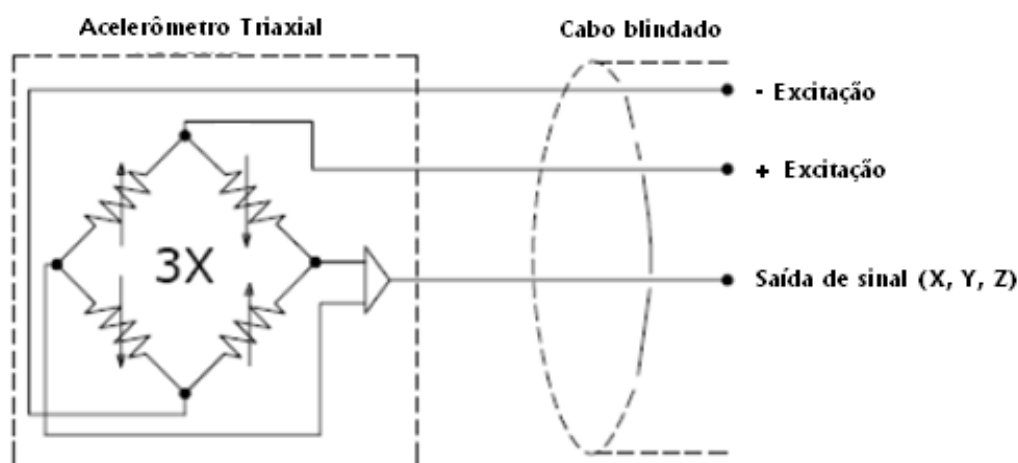


Figura 2. Diagrama esquemático do acelerômetro triaxial utilizado para medição da oscilação do molde de lingotamento contínuo.

Apesar do princípio simples de funcionamento do acelerômetro triaxial, a sua construção exige grande precisão e tecnologia para que sejam possíveis medições de aceleração nas direções transversal, horizontal e vertical, simultaneamente, de modo independente e utilizando o mesmo invólucro.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



Neste desenvolvimento foram utilizados acelerômetros triaxiais de baixo ruído para aplicações em baixa e alta frequência, fundo de escala de $\pm 2 \text{ g}$ ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$), transdutor com encapsulamento de alumínio anodizado e cabeamento integrado. Além disso, conta com elemento sensor amortecido com gás, proporcionando elevada proteção contra sobre tensão e exibe resposta em frequência plana em toda faixa de temperatura de trabalho, entre -40°C a $+125^\circ\text{C}$.

Os sinais obtidos de cada acelerômetro são convertidos em sinal digital por um condicionador de sinal modelo NI 9205 (figura 3) que possui 32 entradas *single-ended* ou 16 entradas analógicas diferenciais, resolução de 16 bits e taxa de amostragem máxima de 250 kS/s. Todos os canais também possuem faixas de entrada programáveis de $\pm 200 \text{ mV}$, ± 1 , ± 5 e $\pm 10 \text{ V}$. Esse módulo possui proteção contra transientes de sinal e sobretensão de até 60 V entre os canais de entrada e o comum (COM). Além disso, também possui uma barreira dupla de isolamento entre os canais e o terra do sistema, proporcionando segurança, imunidade ao ruído e ampla faixa de tensão no modo comum.



Fonte: National Instruments (www.ni.com).

Figura 3. Condicionador de sinal NI 9205 com entradas analógicas para os acelerômetros.

A partir da conversão dos sinais, eles são enviados ao computador no qual está instalado o software de controle responsável pela leitura dos dados transmitidos, pelo seu processamento, a sua apresentação e o armazenamento dos valores de medição. Este software está configurado para realizar várias leituras a uma frequência pré-ajustada, podendo apresentar, a cada 2 segundos ou mais, os valores obtidos dos acelerômetros em cada um dos moldes de lingotamento. A etapa de processamento dos sinais consiste em aplicar filtros para eliminar ruídos indesejáveis, funções matemáticas de conversão para unidade de engenharia, cálculos e operações de comparação dos valores medidos com padrões definidos, entre outros.

Para todos os eixos de deslocamento foram utilizados filtros. A partir dos sinais filtrados são calculados os valores das frequências fundamentais para cada um dos sinais. Os valores destas frequências, além de já serem resultados finais relativos à frequência de oscilação do molde, também servem como variável para o cálculo do ajuste da amplitude dos deslocamentos.

Outra função utilizada na etapa de processamento diz respeito à identificação automática da oscilação do molde. Esta função faz com que, somente deslocamentos contínuos no molde de oscilação sejam registrados. Para que isto seja possível, foram definidos limites de deslocamento atrelados a medições de velocidade. Assim, apenas quando for detectado deslocamento no eixo vertical de todos os acelerômetros superior a 1,25 mm e velocidade maior do que 1,5 mm/s o

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



sistema registrará os dados e, desde que esse deslocamento permaneça por mais de 10 segundos, caso contrário, os dados não são apresentados ou armazenados. Vale destacar que estes limites podem ser alterados de acordo com a característica de cada equipamento a ser monitorado.

A fim de calibrar e, ao mesmo tempo, validar os valores de deslocamento e frequência obtidos pelo sistema desenvolvido, foi utilizada uma máquina de fadiga Instron 8872 com acionamento hidráulico e que permite o controle preciso da frequência e da amplitude, bem como permite definir a forma da onda de deslocamento a ser gerada, como por exemplo: senoidal, triangular, quadrada etc. Conforme é mostrado na figura 4, os acelerômetros foram acoplados ao cabeçote da máquina no qual são aplicados o deslocamento e a frequência desejada.

Esta etapa de calibração e validação das leituras foi realizada para os três eixos de deslocamento, sendo que, para o eixo vertical foi realizada na faixa de frequência de 0,83 Hz a 4 Hz e com um deslocamento com amplitude variável até 4 mm. Em relação aos eixos horizontal e transversal, foram aplicadas frequências de oscilação maiores, acima de 10 Hz e atreladas a deslocamentos menores, como 0,01 mm. Tal configuração tem como objetivo simular deslocamentos nessas direções e que devem ser iguais a zero. Todos estes valores de deslocamento e frequência são passíveis de alteração de modo a atender à faixa de operação do equipamento.

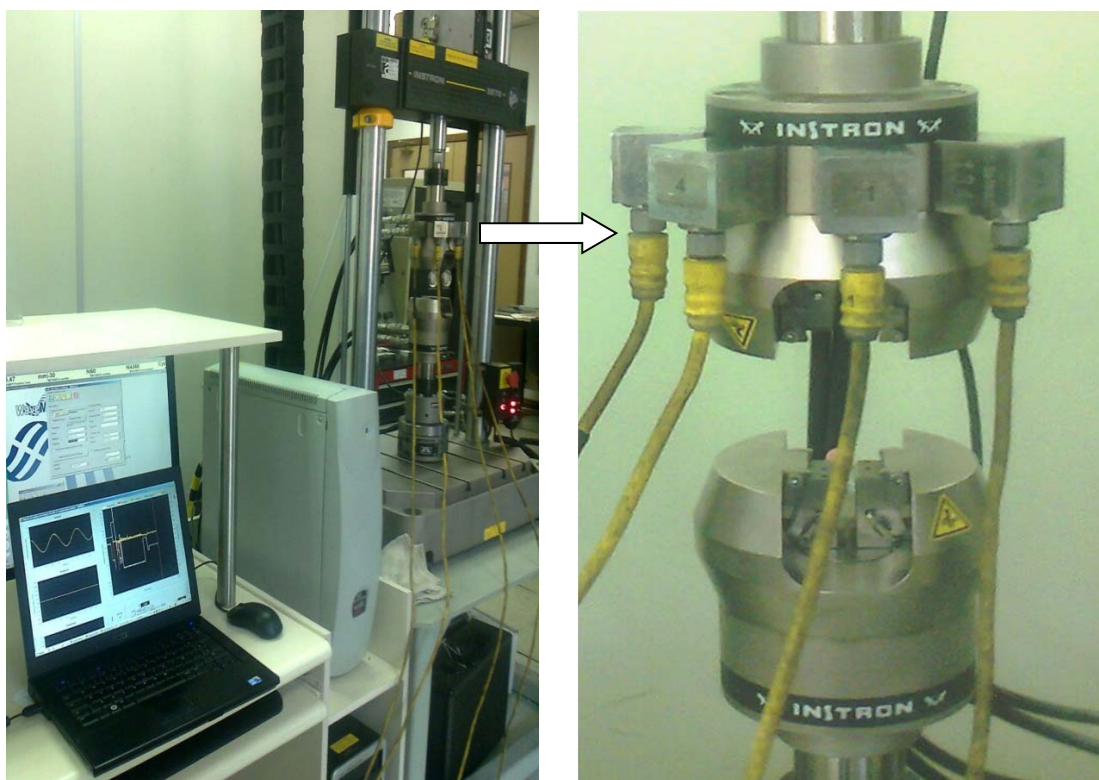


Figura 4. Sistema de medição da oscilação do molde em teste de validação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 são apresentadas as curvas de validação após o processo de calibração dos sensores de medição. Essas curvas mostram o comportamento dos sensores em diferentes valores de frequência de oscilação, quais sejam: 0,83, 1,20, 1,33, 1,50, 2,0 e 2,50 Hz, para um deslocamento igual a ± 3 mm e intervalo de amostragem ajustado para 2 s.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

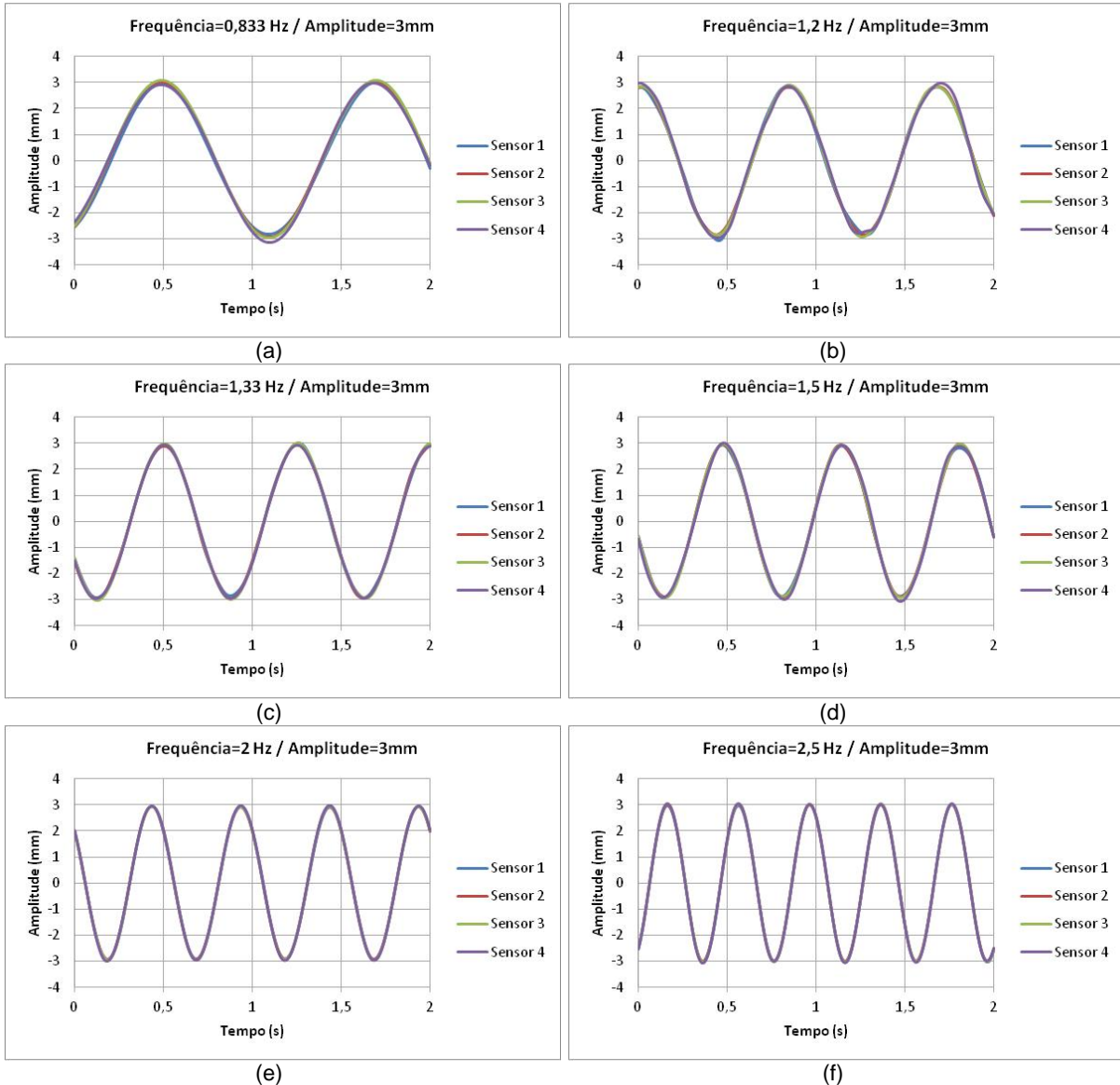


Figura 5. Curvas de validação das medições obtidas pelo sistema a partir da simulação em máquina de fadiga.

A Figura 6 apresenta o gráfico para uma frequência de 2 Hz (120 ciclos por minuto) e uma amplitude de oscilação igual a 2 mm. O intervalo de amostragem do sistema está ajustado, também, para 2 s.

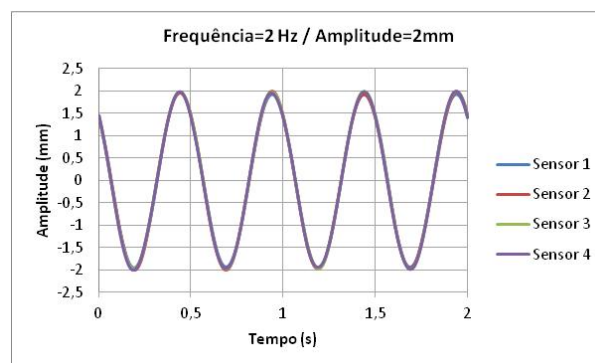


Figura 6. Curva de validação da medição com frequência de 2 Hz e amplitude de 2 mm.



Verifica-se nos gráficos apresentados nas Figuras 5 e 6 que os valores dos quatro sensores estão sobrepostos, ou seja, apresentam o mesmo comportamento e mantém os valores relativos às amplitudes selecionadas (3 mm e 2 mm), mesmo com a alteração dos valores da frequência de oscilação. Esses testes validam o modelo matemático desenvolvido para calibração dos sensores nas frequências definidas.

Os dados coletados e processados são apresentados na tela do software desenvolvido, apresentada na Figura 7. Nesta tela são apresentados quatro gráficos: deslocamento vertical, horizontal e transversal de cada um dos sensores e, um quarto gráfico, composto pelos valores de amplitude dos deslocamentos verticais de cada acelerômetro conjugado com o valor da frequência medida, além de apresentar as diferenças de deslocamento entre cada sensor adjacente a fim de se poder visualizar possível desalinhamento no deslocamento do molde de oscilação.

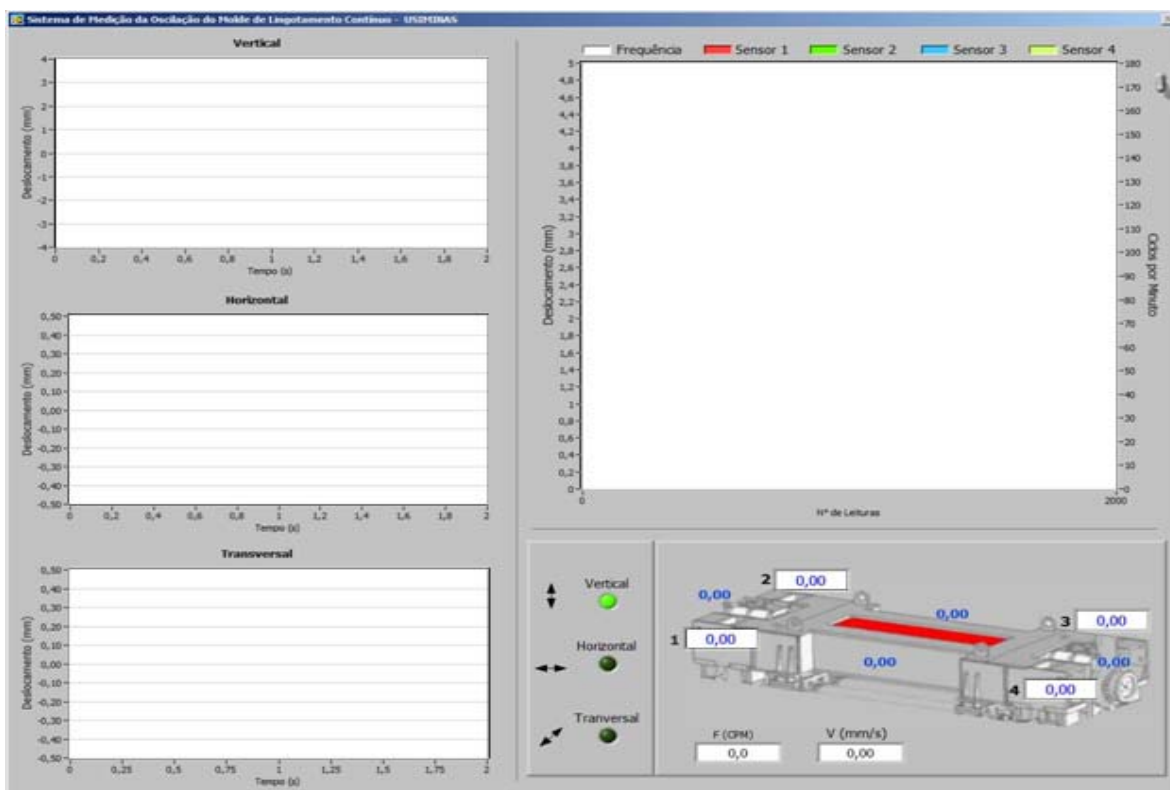


Figura 7. Tela do software de controle desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Usiminas.

Ao término do processamento tem-se a fase de armazenamento dos dados. Esse é realizado em um arquivo de dados no formato ASCII criado automaticamente pelo sistema e que armazena em colunas o horário da leitura (tempo), a frequência (ciclos por minuto), os valores de deslocamento vertical para cada sensor e os valores das diferenças entre os sensores adjacentes.

Nos testes industriais, cada um dos sensores foi instalado em um dos vértices do molde a fim de se poder obter a diferença de deslocamento em cada ponto. O sistema foi instalado na Máquina de Lingotamento Contínuo n°2, constituída pelos veios de lingotamento n°3 e n°4. Foram realizadas medições com o molde a frio, ou seja, sem a presença de aço em seu interior. Nesta condição foram feitas alterações no parâmetro de assimetria da máquina, responsável por gerar o sinal de deslocamento. A frequência de oscilação foi mantida constante em 2 Hz (120 ciclos por minuto) e a amplitude inicial foi ajustada para 2,5 mm. A Figura 8 apresenta os

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



gráficos onde se pode verificar a influência da assimetria na forma de onda representativa do deslocamento do molde.

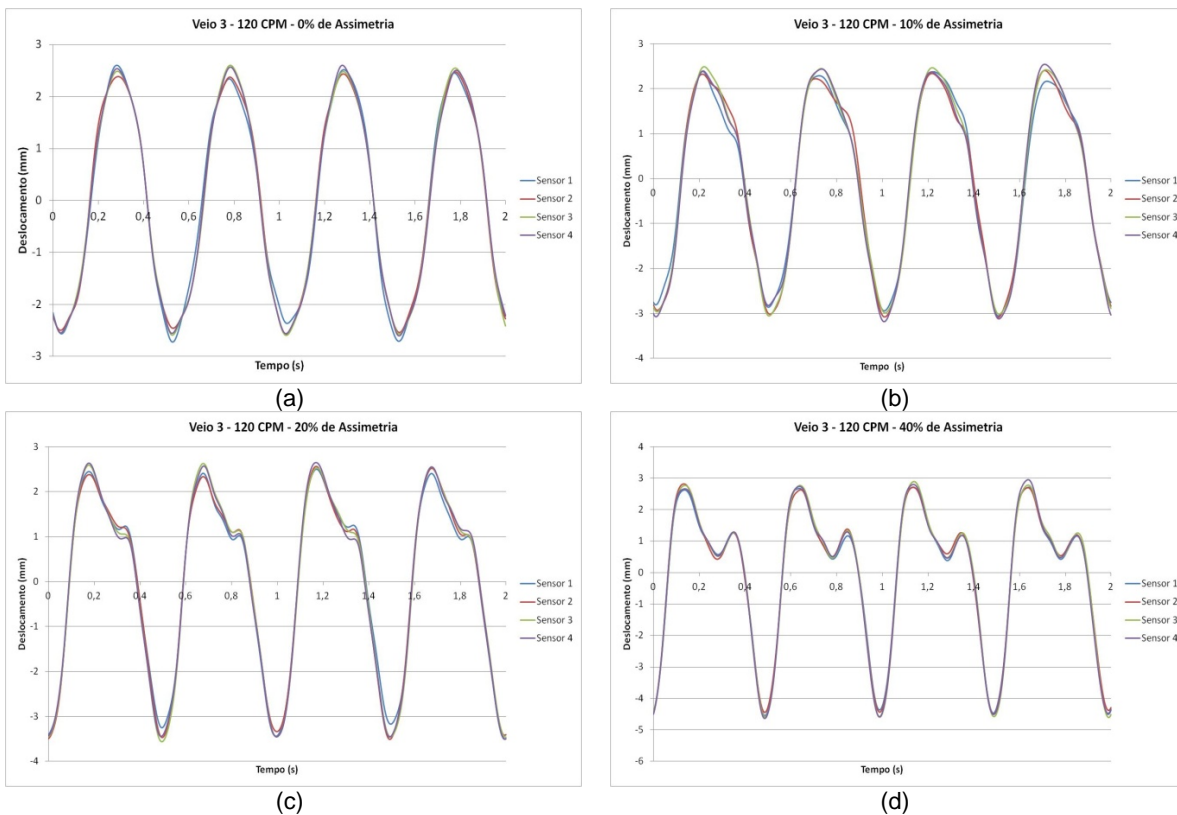


Figura 8. Curvas do lingotamento contínuo com alterações do parâmetro de assimetria.

Nos gráficos apresentados na figura 8, percebe-se que o tempo de descida do molde passa a ser maior do que o de subida quando se altera o parâmetro de assimetria. Com o sistema desenvolvido instalado é possível verificar o comportamento do molde sob influência desse parâmetro. Verifica-se nos gráficos um amortecimento na direção do sentido negativo da curva, sendo que, com o sistema ajustado para 40% de assimetria este amortecimento chega a provocar, durante a sua descida, um retorno maior no molde para depois retornar ao movimento de descida. Além dessa observação, verifica-se que esse parâmetro proporciona um aumento na amplitude do deslocamento, mas de forma não proporcional, ou seja, é mantido o pico positivo no valor ajustado de deslocamento e ampliado o pico negativo com o aumento do valor da assimetria.

Realizados os testes a frio no molde, a figura 9 apresenta os valores obtidos nos teste industriais a quente e que são apresentados diretamente na tela do software desenvolvido. Nesta medição a amplitude foi ajustada para 2,1 mm e a frequência de oscilação para 1,67 Hz (100 ciclos por minuto). Verifica-se na tela a existência de deslocamento somente no eixo vertical, demonstrando o perfeito funcionamento do molde nesta condição de processamento.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

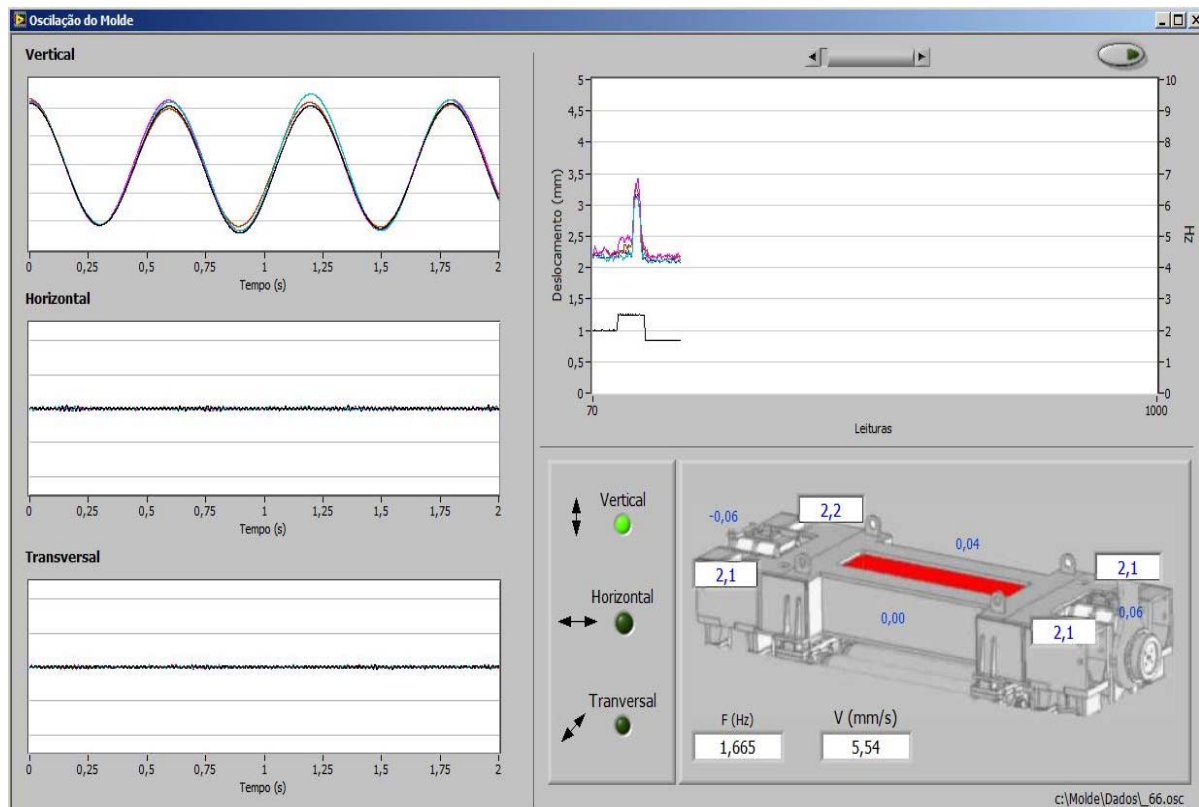


Figura 9. Gráfico de medição dos deslocamentos no veio 3 da máquina 2 de lingotamento contínuo.

Com a implantação do sistema é possível obter um melhor entendimento em relação ao conjunto controlador da oscilação das máquinas o que vem a colaborar com a manutenção do equipamento, bem como estabelecer as melhores práticas de oscilação por grupo de aços. Além disso, a Usiminas passa a deter o domínio da tecnologia de medição e processamento da oscilação, possibilitando implementar análises pós processadas, como tempo de estripamento negativo e positivo, posição do molde no tempo, avaliação quantitativa dos pós fluxantes, entre outras, e correlacionar os parâmetros de processo que influenciam na qualidade superficial do produto com os valores de oscilação obtidos. Ao final visa-se obter um histórico de tendência de desgastes do oscilador e a integração do sistema desenvolvido com os sistema de controle de instrumentação da máquina de lingotamento contínuo.

4 CONCLUSÃO

O equipamento desenvolvido possibilita a monitoração dos parâmetros de oscilação do molde sendo possível obter novas informações sobre o processo de lingotamento do aço. Ele apresenta, no eixo vertical, uma ótima resposta nas faixas de frequências utilizadas pelo lingotamento na Usina de Ipatinga, podendo essa faixa ser ampliada de acordo com as necessidades do processo. As oscilações nos eixos horizontal e transversal também foram possíveis de serem visualizadas, mesmo com baixas amplitudes.

5 REFERÊNCIAS

- 1 Reynolds T, FitzeL H, Harvey A, Juza P, Mörwald K, Winder E. The Design of Flat and Long Products Casters. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation; 2003. p.54.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.