

# UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADAS À ÁREA DE MANUTENÇÃO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS LONGOS<sup>1</sup>

*Cristiano Corrêa Mendes<sup>2</sup>  
Antônio Eustáquio de Melo Pertence<sup>3</sup>  
Ramon Guelber Martins<sup>4</sup>  
Glauber Diniz César e Carvalho<sup>5</sup>*

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho foi a aplicação de ferramentas de simulação numérica nas áreas de manutenção de uma usina siderúrgica, através de estudo prático na Máquina de Lingotamento Contínuo. Foi estudado o comportamento dinâmico do conjunto oscilador do molde através da utilização de duas técnicas numéricas, sendo uma baseada na modelagem multicorpos seguida da modelagem por elementos finitos. A primeira permitiu o entendimento do funcionamento do equipamento quanto ao seu cinematismo. Na segunda foram desenvolvidas análises estáticas e dinâmicas, onde foi possível obter os níveis de tensão e deformação. A fase dinâmica contou com um estudo modal. Os resultados esperados puderam ser mensurados através de diferentes perspectivas. Pela manutenção, a redução de paradas acidentais. Pela operação e controle de processo, a obtenção de tarugos com boa qualidade superficial. Pelo lado profissional, o desenvolvimento técnico da equipe.

**Palavras-chave:** Simulação; Manutenção, Lingotamento contínuo.

## **USING NUMERICAL SIMULATION TOOLS APPLIED TO THE MAINTENANCE AREA OF CONTINUOUS CASTING OF LONG CARBON STEEL**

### **Abstract**

The purpose of this work was the employment of the numerical simulation tools in the maintenance areas of a steel mill, through practical study in the Continuous Casting Machine. The dynamic behavior of the mold oscillation system was studied by using two numerical techniques, one based on multibody modeling followed by the modeling by finite element. The first allowed the understanding of the equipment functioning regarding its kinematics. In the second, static and dynamic analysis was developed, in which it was possible find the stress and deformation levels. The dynamic phase had a modal study. The expected results could be measured through different perspectives. For maintenance, reduction of accidental shutdown. For the operation and process control, the manufacturing of good surface quality billets. On the professional perspective, the development of the team technician.

**Key words:** Simulation; Maintenance; Continuous casting.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico da ArcelorMittal Monlevade e Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG.*

<sup>3</sup> *Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, Doutor.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico da ArcelorMittal Monlevade.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico da Vibracon Engenharia Ltda.*

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo tem como função a transformação do aço líquido em aço sólido de forma contínua. Neste processo, o aço líquido é vazado de uma panela para um reservatório denominado distribuidor e deste para o molde, que é responsável por modelar o aço. Uma vez no molde, o aço líquido irá entrar em contato com uma lingoteira de cobre refrigerado a água, que irá promover seu resfriamento, formando uma casca sólida de uma espessura tal a permitir que o líquido remanescente não seja expulso rompendo esta casca. Este molde oscila verticalmente e o líquido interno remanescente será solidificado a partir de um conjunto de dispositivos, posicionados ao longo da MLC – Máquina de Lingotamento Contínuo, responsáveis por pulverizar água na superfície do tarugo.<sup>(1-2)</sup>

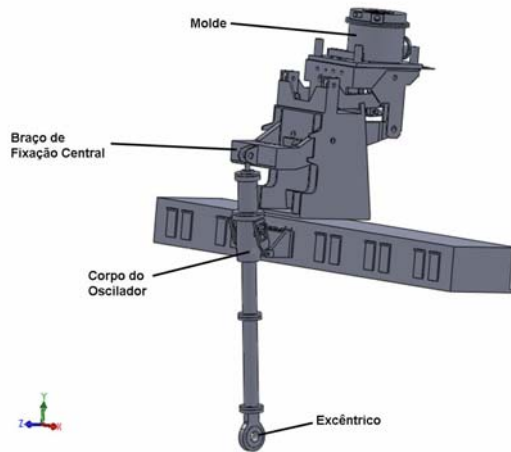
A oscilação do molde é extremamente importante para este processo e é gerada por um conjunto mecânico de oscilação que tem como função transferir movimento de oscilação ao molde e evitar um dos principais problemas enfrentados por este processo: o agarramento do tarugo no molde. Este agarramento pode levar ao rompimento da casca sólida do tarugo e conseqüente vazamento de aço líquido. Este conjunto de oscilação é formado basicamente por componentes mecânicos e o movimento de oscilação é gerado através de um excêntrico montado na saída do acionamento e transmitido ao molde.

O objetivo deste trabalho é entender o funcionamento do conjunto oscilador da MLC (Máquina de Lingotamento Contínuo) da ArcelorMittal Monlevade, através da utilização da ferramenta de simulação numérica, identificando também possíveis pontos de melhoria para o processo. O conjunto foi modelado em 3D e, através da utilização de técnicas de modelagem numérica, seu comportamento foi avaliado. Estas técnicas são: análise multicorpos, análise modal, análise estrutural estática e análise de fadiga. Para estas três últimas utilizou-se o método dos elementos finitos.

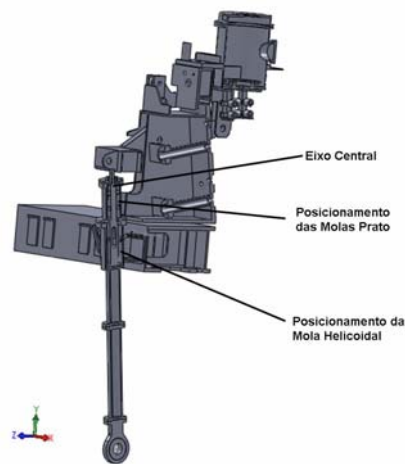
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram considerados os materiais utilizados no conjunto em funcionamento conforme projeto para construção do modelo 3D. Segue abaixo a identificação dos principais componentes do conjunto e suas respectivas funções, que também estão apresentados nas Figuras 1 e 2:

- acionamento – conjunto motor-redutor com variação de rotação de 180 rpm a 260 rpm em função da velocidade de extração do tarugo;
- excêntrico – montado na saída do acionamento e responsável pela geração do movimento de oscilação, sendo sua excentricidade igual a 4,30 mm;
- corpo do oscilador – responsável pela ligação entre excêntrico, molas e eixo central;
- mola helicoidal – responsável pelo equilíbrio do sistema molde x conjunto oscilador;
- molas prato – responsável pela absorção de variações externas ao sistema, atuando também como fusível para evitar a quebra do conjunto oscilador em caso de travamento do molde, dependendo da pré-carga aplicada ao conjunto de molas; e
- eixo central – responsável direto pela transmissão do movimento de oscilação gerado pelo excêntrico ao molde, através de contato com braço de fixação central.

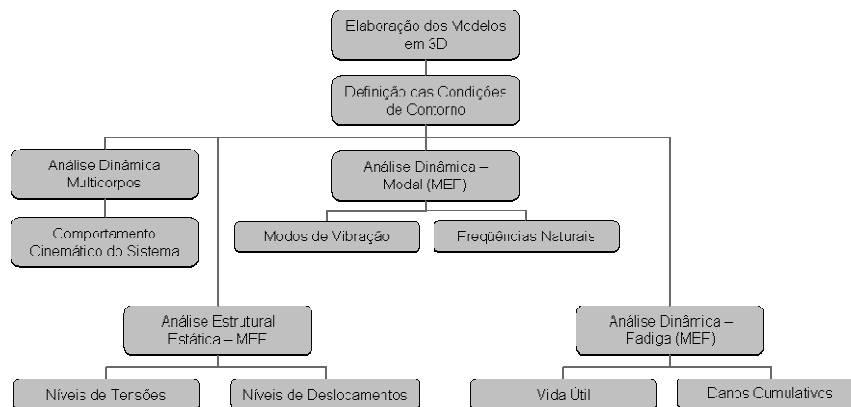


**Figura 1.** Modelo 3D do Oscilador.<sup>(3)</sup>



**Figura 2.** Modelo 3D em corte do Oscilador.<sup>(3)</sup>

Para entendimento do funcionamento do oscilador e identificação de possíveis pontos de melhoria foram aplicadas técnicas de modelagem e estas técnicas estão relacionadas na Figura 3.



**Figura 3.** Técnicas de Modelagem Utilizadas.

Os modelos 3D são representações fiéis do conjunto físico presente na MLC e adaptados de acordo com as particularidades requeridas pelos métodos de simulação utilizados.

## 2.1 Análise Dinâmica Multicorpos

Sistemas mecânicos e mecanismos em geral consistem em uma interconexão de subsistemas sujeitos a grandes deslocamentos. A coleção destes subsistemas chamados corpos, componentes ou subestruturas definem um sistema de multicorpos. Esta análise permite, através de uma ação, seja ela um motor, uma força, aceleração ou velocidade, observar o comportamento de componentes inseridos em um sistema, considerando a interação destes com outros componentes por meio de relações de juntas (vinculações, como pivotamentos) ou contatos (engrenamentos, colisões, etc.).<sup>(4-5)</sup>

No caso em estudo, por meio da rotação de entrada do motor acoplado ao disco excêntrico, foi possível observar o comportamento espacial do molde, considerando, no entanto, a influência da geometria e massa das peças. O modelo considera ainda a rigidez e a pré-carga definida para as molas prato e helicoidal. As relações de juntas de revolução entre os braços do oscilador e suporte do molde definem o mecanismo de sustentação do molde, conforme Figura 4.

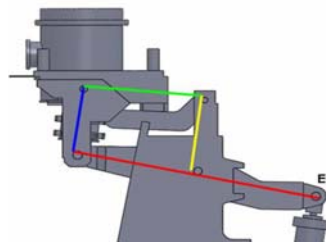


Figura 4. Mecanismo de Sustentação do Molde.<sup>(3)</sup>

A amplitude de deslocamento do eixo central, por sua vez, depende da geometria do disco excêntrico e da rigidez das molas. Em condições normais de operação, o deslocamento do ponto E (Figura 4) deve ser igual à excentricidade do disco rotativo. Entretanto as molas prato trabalham como um fusível no momento em que há uma restrição ao movimento do molde. Em outras palavras, as molas prato deformam apenas no momento em que os esforços no sistema superam as cargas necessárias para o deslocamento do molde com o lingote em escoamento. Isso ocorre quando há um travamento do molde na lingoteira, pelo agarramento do tarugo em seu interior ou outro fator que limite o movimento do mesmo. Diante disto, o modelo multicorpos desenvolvido contempla condições de contato 3D entre partes móveis do eixo central, de forma a permitir a deformação das molas em situação que a carga de oscilação do molde seja excessiva. O comportamento cinemático do sistema foi avaliado em duas situações (210 rpm e 260 rpm). A excentricidade do sistema é de valor igual a 4,3mm. A Figura 5 mostra os contatos entre as partes móveis.

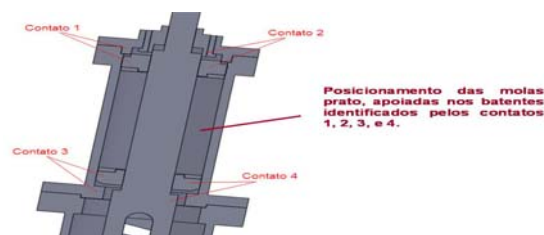


Figura 5. Contatos Partes Móveis.<sup>(3)</sup>

## 2.2 Análise Dinâmica – Modal

Nesta análise são calculadas as freqüências naturais com seus respectivos modos de vibração com o objetivo de identificar possíveis problemas de ressonância, que acontecem devido ao acoplamento das freqüências de excitação dos equipamentos com suas freqüências naturais, ou ainda problemas dinâmicos devido ao acoplamento de múltiplos das freqüências naturais e de excitação.<sup>(6-7)</sup> O método dos elementos finitos foi utilizado neste estudo e os principais parâmetros considerados são as condições de restrição (Figura 6) e a formação da malha com elementos tetraédricos de segunda ordem (tamanho 45 mm, total de nós 503.841, total de elementos 287.741), conforme Figura 7.<sup>(8)</sup>

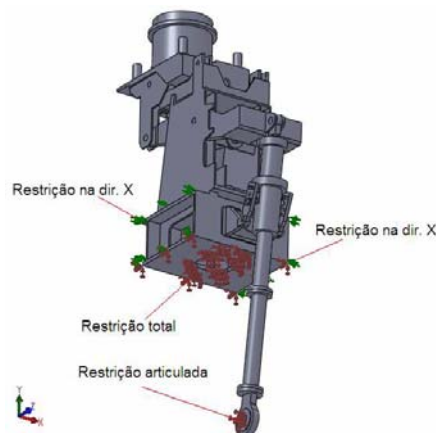


Figura 6. Condições de Restrição.<sup>(3)</sup>

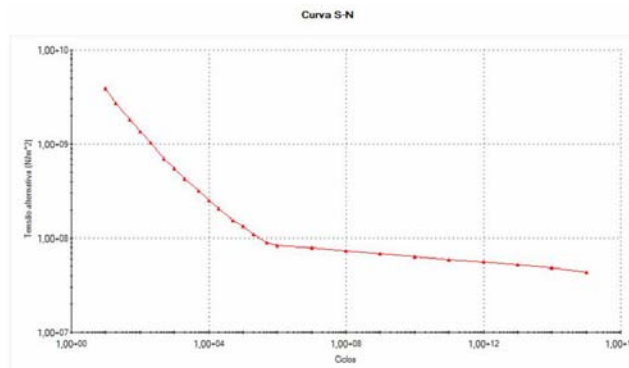


Figura 7. Malha de Elementos Finitos.<sup>(3)</sup>

## 2.3 Análise Estrutural Estática / Dinâmica – Fadiga

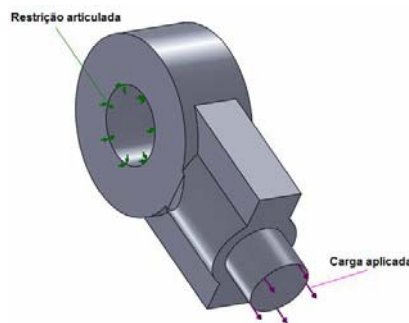
A ligação entre eixo central e braço maior do oscilador é dada por meio de um terminal rotular (ponto E da Figura 4). Este terminal é conectado à haste móvel do eixo central, através de um pino, o qual contempla um histórico de falhas. Diante disto foi simulada situação em que este terminal, juntamente com o pino é submetido a uma carga unidirecional, cuja magnitude é tomada a partir dos máximos valores obtidos nos estudos da análise multicorpos.

Como o carregamento é variável, optou-se por desenvolver um estudo de fadiga de forma a analisar a vida do componente diante de seu ciclo de carga. Uma curva S-N foi estimada para que se pudesse verificar a vida do componente em número de ciclos e esta é mostrada na Figura 8.



**Figura 8.** Curva S-N.<sup>(9)</sup>

O método dos elementos finitos também foi utilizado nestes estudos e os principais parâmetros considerados são as condições de contorno (Figura 9) e a formação da malha com elementos tetraédricos de segunda ordem (tamanho 5 mm, total de nós 227.992, total de elementos 158.581), como Figura 10.<sup>(8)</sup>



**Figura 9.** Condições de Contorno.<sup>(3)</sup>



**Figura 10.** Malha de Elementos Finitos.<sup>(3)</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análise Dinâmica Multicorpos

Os resultados das análises cinemáticas estão exibidos em forma de gráficos de deslocamentos e forças em função do tempo para as rotações de 210 rpm e 260 rpm. Para cada rotação foram obtidos os seguintes resultados:

- a posição do centro de gravidade molde;
- a distância entre as bases das molas prato; e
- as forças de reações no terminal rotular (ponto E da Figura 4).

### 3.1.1 Rotação de 210 rpm

As Figuras 11 a 15 mostram os resultados obtidos para esta rotação.

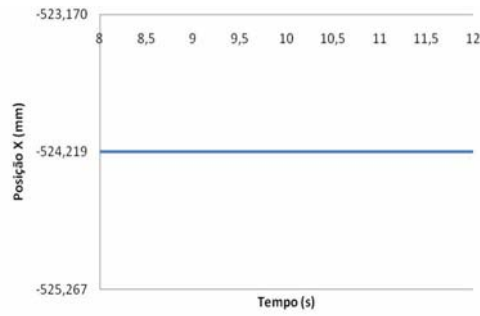


Figura 11. Posição X do Centro de Gravidade do Molde 210 rpm.<sup>(10)</sup>

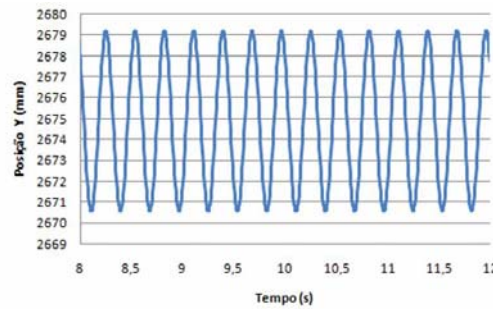


Figura 12. Posição Y do Centro de Gravidade do Molde 210 rpm.<sup>(10)</sup>

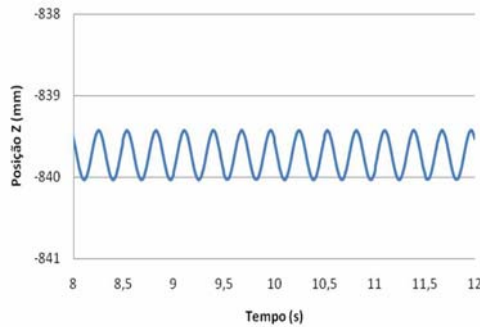


Figura 13. Posição Z do Centro de Gravidade do Molde 210 rpm.<sup>(10)</sup>

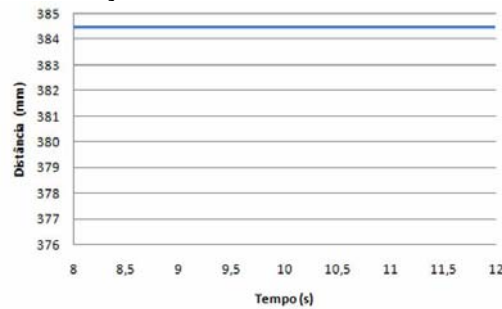
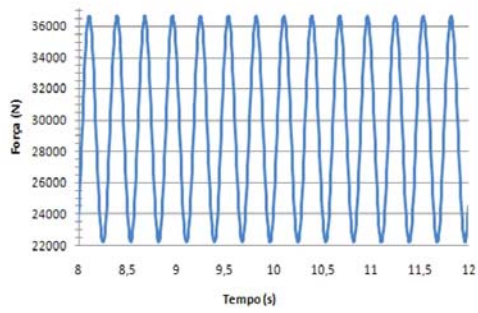


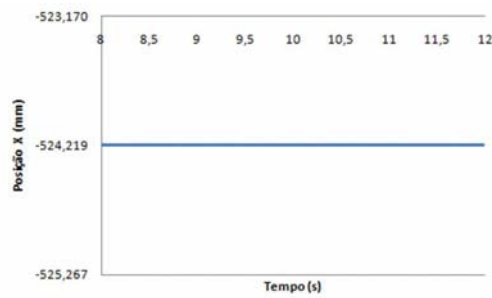
Figura 14. Distância Bases Molas Prato 210 rpm.<sup>(10)</sup>



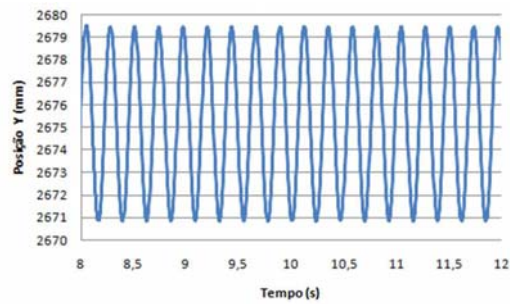
**Figura 15.** Força Reação Terminal 260 rpm.<sup>(10)</sup>

### 3.1.2 Rotação de 260 rpm

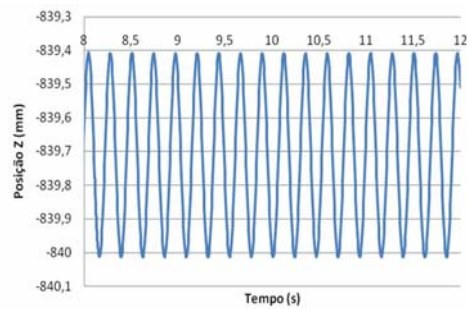
As Figuras 16 a 20 mostram os resultados obtidos para esta rotação.



**Figura 16.** Posição X do Centro de Gravidade do Molde 260 rpm.<sup>(10)</sup>

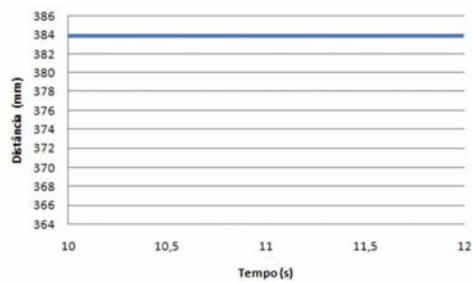


**Figura 17.** Posição Y do Centro de Gravidade do Molde 260 rpm.<sup>(10)</sup>

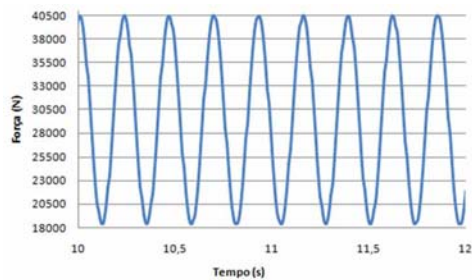


**Figura 18.** Posição Z do Centro de Gravidade do Molde 260 rpm.<sup>(10)</sup>





**Figura 19.** Distância Bases Molas Prato 260 rpm.<sup>(10)</sup>



**Figura 20.** Força Reação Terminal 260 rpm.<sup>(10)</sup>

### 3.1.3 Discussão dos resultados

Os gráficos analisados permitiram identificar a trajetória do movimento do centro de massa atual em função do tempo, o que nos mostra um pequeno deslocamento na direção Z (horizontal) do molde de amplitude equivalente a 0,6 mm em ambas as rotações. Este deslocamento na prática e sem esta análise poderia ser considerado como não existente em função da concepção do equipamento. Na direção Y (vertical) foi identificado um deslocamento de amplitude igual a 8,4 mm e 8,6 mm para as rotações de 210 rpm e 260 rpm, respectivamente. Estes resultados são compatíveis com a excentricidade geradora do movimento de 4,3 mm. Para a direção X não foi verificado movimento, o que também é compatível com a situação de projeto. As direções X, Y e Z são apresentadas nas Figuras 1 e 2.

Como esperado, os esforços máximos monitorados no terminal rotular aumentam em função do aumento da rotação do equipamento (36.511N para 210 rpm e 40.343 N para 260 rpm). Isto se deve à elevação nos valores de aceleração do movimento oscilatório do molde. Como a massa é constante, temos por " $F = m.a$ " um acréscimo no esforço observado. Para a faixa de rotação de trabalho do equipamento, o esforço mínimo de tração no terminal rotular diminui com o aumento da rotação (22.427N para 210 rpm e 18.641N para 260 rpm), o que mostra a predominância do peso do molde no seu movimento descendente.

Não existe compressão das molas pratos durante o funcionamento do sistema. Isto significa dizer que os valores adotados de pré-carga das molas prato são superiores aos esforços proporcionados pelo movimento oscilatório do molde, o que está condizente com a proposta deste sistema, operar como fusível em situações de sobrecarga. Porém, coletando a carga sobre o terminal rotular, verifica-se que a carga máxima necessária para movimentar o molde atual é de 40.343N no modelo numérico proposto para 260 rpm, diante da pré-carga de 53.955N atualmente adotada. O fato de se operar com uma pré-carga maior que o exigido pelo sistema resulta na existência de esforços também maiores no equipamento.

### 3.2 Análise Dinâmica – Modal

O resultado da análise modal está demonstrado pelas Figuras 21 e 22, onde é exibido *isolayer* da magnitude de deslocamento do primeiro modo de vibração (simulados os 10 primeiros) e a relação das sete primeiras freqüências naturais com as freqüências de trabalho (simulado as 20 primeiras), respectivamente.

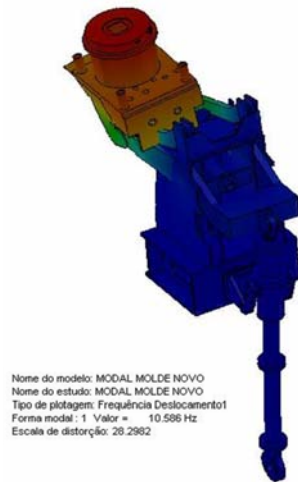


Figura 21. 1° Modo de Vibração.<sup>(3)</sup>

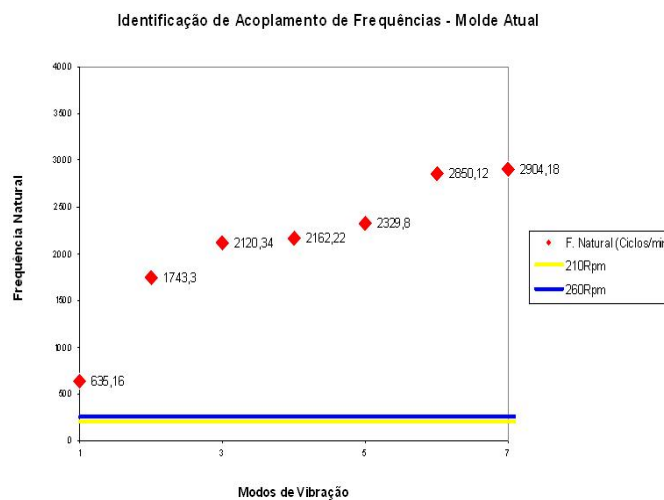


Figura 22. Relação Freqüências Naturais x Freqüências de Trabalho.

#### 3.2.1 Discussão dos resultados

A partir da interpretação destes resultados, verifica-se a não existência de acoplamentos entre freqüências de trabalho e freqüências naturais do sistema, nem mesmo problemas devido ao acoplamento de múltiplos das freqüências naturais e de excitação, o que poderiam causar problemas de ressonância.

### 3.3 Análise Estrutural Estática / Dinâmica – Fadiga

Os resultados da análise estática estão apresentados em forma de *isolayer* de tensão efetiva através da Figura 23 e os de fadiga por meio de vida útil, conforme Figura 24.

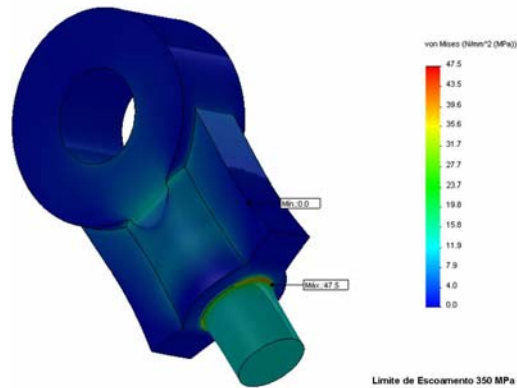


Figura 23. Tensão Efetiva – Von Mises. (3)

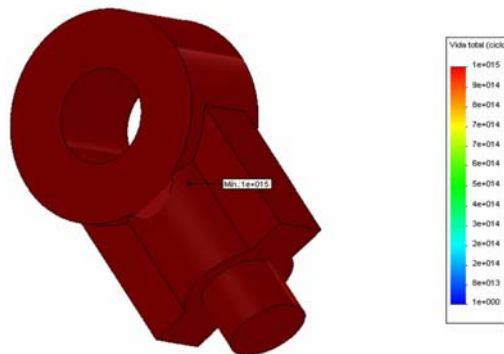


Figura 24. Vida Útil. (3)

#### 3.3.1 Discussão dos Resultados

A verificação estática realizada considera carregamentos uniaxiais, o que retrata o comportamento de projeto do componente. Sob este tipo de esforço é possível perceber que o terminal apresenta estabilidade estática para as tensões analisadas.

Considerando o carregamento cíclico, o componente apresenta uma vida infinita, ou seja, superior a 10<sup>15</sup> ciclos. Vale ressaltar que a curva S-N utilizada (figura 8) retrata a curva sugerida pela ASME, até 10<sup>6</sup> ciclos. A parte restante deste gráfico foi feita por extrapolação seguindo a tendência da curva S-N e ASME. Com relação ao dano linear, o resultado para o terminal está em sua totalidade inferior a 0,10. Isto significa que menos de 10% da vida útil deste componente foi consumida na simulação realizada.

Através destes resultados conclui-se que o pequeno histórico de quebras existente no conjunto oscilador não é devido problemas de concepção de projeto e sim devido a alguma variação externa ao sistema ou agarramentos, desalinhamentos, etc.

## 4 CONCLUSÕES

Após a análise de todo o comportamento dinâmico e estático do conjunto oscilador do molde da MLC, percebe-se que de forma geral o equipamento está trabalhando de forma coerente com o projeto. Porém, alguns pontos são importantes de serem ressaltados:

- coerência do movimento de oscilação do molde com o transmitido pelo excêntrico;
- não existência de compressão das molas pratos, também coerente com a proposta do sistema;
- ausência de acoplamentos entre frequências de trabalho e frequências naturais do sistema;
- o terminal rotular, que possui um pequeno histórico de quebra, apresenta estabilidade estática;
- na análise de fadiga, o terminal rotular apresenta vida infinita; e
- adoção de pré-carga maior do que o sistema realmente exige para as molas prato, o que pode causar problemas futuros de desgaste ou quebra do conjunto oscilador devido a esforços excessivos.

O objetivo geral do trabalho de entender o funcionamento do oscilador foi atendido, uma vez que todas as premissas de projeto foram verificadas na simulação numérica. Também foi possível identificar oportunidades de melhorias, como a adoção de uma pré-carga menor nas molas prato, conforme percebido na análise multicorpos.

Algumas recomendações de novos trabalhos estão relacionadas a seguir com o objetivo de aprofundar este estudo e também de validar algumas informações, uma vez que o modelo desenvolvido considera uma situação de trabalho ideal, sem interferências externas como problemas de desalinhamento, desgaste dos componentes, problemas de montagem, entre outros:

- validação do modelo computacional através de medições reais realizadas no sistema através da instalação de sensores nos pontos analisados neste trabalho;
- desenvolver modelo computacional e simular a oscilação real no molde em função da transmissão do movimento pelo excêntrico, através dos pontos de deslocamento identificados na análise multicorpos; e
- instalação de célula de carga no eixo vibratório com o objetivo de se encontrar a pré-carga mínima real necessária às molas prato.

## Agradecimentos

À ArcelorMittal Monlevade pela oportunidade e apoio para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecimento especial aos colegas Ramon Martins e Glauber Carvalho pela participação efetiva e horas dedicadas ao desenvolvimento dos estudos.

## REFERÊNCIAS

- 1 PENNA, L.V. *Trinca de solidificação off-corner no lingotamento contínuo de tarugos*. 2005. 216p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- 2 VILELA, A.C.F.; SOARES, R.B. *Lingotamento contínuo de blocos e tarugos*. São Paulo: ABM, 2008. p.29, 79–82, 194-195.

- 3 BS7 AUTOMAÇÃO. *Manual de treinamento do CosmosWorks Designer*. Belo Horizonte, 2007.
- 4 BARBOSA, R.S. *Aplicação de sistemas multicorpos na dinâmica de veículos guiados*. 1999. 273 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- 5 SHABANA, A.A. *Dynamics of multibody systems*. New York: Cambridge University, 2005.
- 6 VIBRACON ENGENHARIA LTDA. *Análises estruturais, fadiga e elementos finitos*. Belo Horizonte, 2007. p. 1-28.
- 7 EWINS, D.J. *Modal testing: theory and practice*. London: Research Studies, 1984.
- 8 ALVES FILHO, A. *Elementos finitos: a base da tecnologia CAE*. São Paulo: Érica, 2005.
- 9 GODEFROID, L.B.; CÂNDIDO, L.C.; MORAIS, W.A. *Análise de falhas*. São Paulo: ABM, 2006. p. 99-129.
- 10 BS7 AUTOMAÇÃO. *Manual de treinamento do CosmosMotion Advanced*. Belo Horizonte, 2007.