

ANÁLISE DE FALHA NO SISTEMA HIDRÁULICO DO PARAFUSO DE APERTO SUPERIOR DO LAMINADOR A FRIO MODELO SENDZIMIR

Antônio Carlos Ataíde, antonio-carlos.ataide@arcelormittal.com.br¹

Alexandre Moura Giarola, sr.giarola@gmail.com²

Paulo Roberto Cetlin, pccetlin@demet.ufmg.br²

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br²

¹ArcelorMittal Inox Brasil, Praça 1º de maio, 09, Centro, CEP 35180-018, Timóteo, Minas Gerais, Brasil

²Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Campos Universitário, CEP 31270.901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: O laminador a frio nº 3, LB3, da ArcelorMittal Inox Brasil possui um sistema de aperto também denominado parafuso de aperto que tem como função principal aplicar força de laminação a fim de reduzir a espessura da tira. No final de 2007 este sistema passou por uma modernização, quando foi elevada a velocidade de atuação dos cilindros hidráulicos que fazem o acionamento do parafuso de 0,090 m/s para 0,600 m/s, e com isso passou a ocorrer fratura da capa que reveste o êmbolo do cilindro hidráulico. Constatou-se que a causa da fratura foram os picos de pressão gerados nos finais de curso do cilindro, que implicava elevadas solicitações mecânicas na capa do êmbolo. Diante deste novo contexto operacional do sistema de aperto, bem como das consequências da falha, foi desenvolvido um novo projeto para o cilindro hidráulico, tendo em vista a redução das solicitações mecânicas que ocorriam nos finais de curso do cilindro. Adicionalmente elaborou-se um FMEA (Análise dos modos de falha e seus efeitos) para o sistema de acionamento do parafuso a fim de evitar, por meio de análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no sistema.

Palavras-chave: Cilindro hidráulico, Parafuso, Picos de pressão

1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste trabalho o resultado de uma análise de falha ocorrida com o sistema hidráulico do parafuso de aperto superior do laminador de bobinas nº 3, que implicou parada do fluxo produtivo de 38 horas. As falhas se iniciaram dois meses após a modernização do equipamento. É apresentada uma breve descrição do parafuso de aperto e de suas funções, e de forma detalhada, a análise das causas de falha dos cilindros hidráulicos.

A análise das causas foi baseada no novo contexto operacional do sistema de aperto que foi alterado durante a modernização do LB3 ocorrida em dez / 2007, quando foi substituído todo o circuito hidráulico.

É apresentado também o novo projeto do cilindro hidráulico que foi desenvolvido tendo em vista a mudança no modo de funcionamento do sistema de aperto, especificamente aumento da velocidade durante a operação de abertura rápida da cadeia de laminação.

Após a análise de falhas elaborou-se um FMEA (Análise dos modos de falha e seus efeitos) para o sistema de acionamento do parafuso de aperto. A metodologia FMEA foi utilizada para avaliação dos modos de falha relacionados ao sistema hidráulico a fim de evitar, por meio da análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no sistema. Além disso, para todos os modos de falha levantados foram definidas atividades de detecção, de forma que a atividade de diagnóstico de falha se tornasse mais fácil. Assim, diante de qualquer falha com o sistema de aperto poder-se-ia recorrer ao documento onde estão registradas tanto as medidas de detecção quanto de prevenção para os modos de falha levantados.

Os principais objetivos deste trabalho são: garantir confiabilidade operacional do laminador de bobinas nº 3; identificar a causa de falha do cilindro hidráulico do lado de operação do sistema de aperto superior; mostrar a importância da busca da causa raiz; analisar os modos e efeitos de falhas relacionados com o parafuso de aperto superior; assegurar o cumprimento das funções do sistema de aperto superior.

2. LAMINADOR A FRIO SENDZIMIR

Laminadores Sendzimir são conhecidos mundialmente pela capacidade de laminar bobinas de materiais extremamente duros e de espessuras muito finas. O pequeno diâmetro do rolo de trabalho permite elevadas reduções em materiais duros tais como aços inoxidáveis e siliciosos. Além disso, fornece excelente acabamento superficial. A Figura

(1) apresenta o agrupamento dos cilindros montados na cadeira de laminação, os rolos indicados pelas letras A até H são chamados de rolamentos de encosto (Sendzimir, 2009).

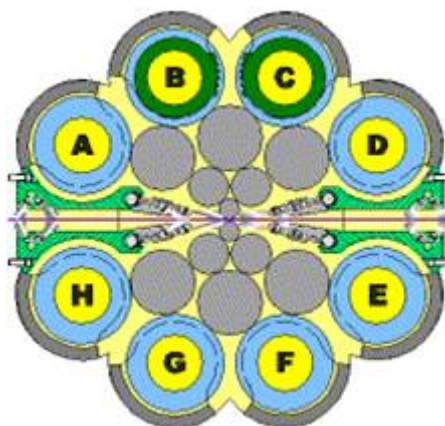


Figura 1. Arranjo dos cilindros de laminação.

3. SISTEMA DE APERTO SUPERIOR

3.1. Descrição do Equipamento

O sistema de aperto, também denominado de parafuso de aperto, é composto de dois cilindros hidráulicos de haste dupla com fixação por flange dianteiro que ficam localizados na parte superior da cadeira de laminação, um do lado de acionamento, *LA* e outro do lado de operação, *LO*. Esses cilindros são ligados aos eixos dos rolamentos de encosto B e C através de transmissão por cremalheiras, o que garante o sincronismo mecânico entre os dois cilindros hidráulicos. Na Figura (2) é apresentada uma vista em corte do sistema onde se vê em destaque a montagem dos cilindros. Observa-se que o lado dianteiro da haste possui maior comprimento e por isto é guiada por bucha montada na estrutura da cadeira de laminação, a fim de garantir o alinhamento do cilindro. Para acionamento dos cilindros é utilizado um servo-sistema hidráulico que junto ao sistema eletrônico promove o controle de posição ou de força do parafuso de aperto.

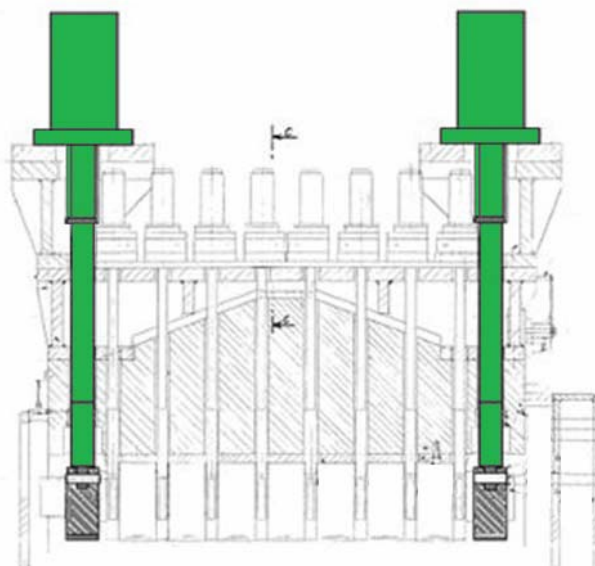


Figura 2. Sistema de aperto superior – vista em corte.

A principal função do parafuso de aperto é promover a abertura e fechamento da cadeira de laminação mediante uma referência de posição gerada pelo comando do operador ou pela referência de posição/força gerada pelo sistema de controle de espessura, *AGC*. Quando é dado um comando para mover o parafuso, por exemplo, para corrigir a espessura da tira, um sinal elétrico é enviado à servo-válvula, que por sua vez direciona o fluxo de óleo para as câmaras apropriadas dos cilindros a fim de deslocar o parafuso. Alcançada a posição de referência, que é medida pelo transdutor de posição montado no cilindro *LA*, a malha de controle de posição retira o sinal da servo-válvula para que o parafuso permaneça na posição desejada.

Outra função do parafuso de aperto é abrir a cadeira rapidamente nos casos de estiramento/ruptura de tira, a fim de evitar danos com os rolos da cadeira e com o material processado. Originalmente a velocidade para esta operação era de 0,090 m/s de forma que o tempo de abertura rápida era de 2 s considerando o curso total do parafuso de 0,176 m, mas

com a modernização feita no final de 2007, esta velocidade passou para 0,600 m/s reduzindo o tempo de abertura para 0,3 s. Para conseguir este aumento da velocidade foi feito novo projeto do circuito hidráulico, no qual foram utilizados componentes especiais para vazões elevadas (elementos lógicos) e novos acumuladores de pressão. Os cilindros hidráulicos, o reservatório e as unidades de bombeamento foram mantidos. O novo painel de válvulas foi montado sobre a cadeira de laminação e comissionado para um tempo de abertura total de 0,38 s. A Figura (3) mostra o novo painel de válvulas montado sobre a cadeira de laminação.

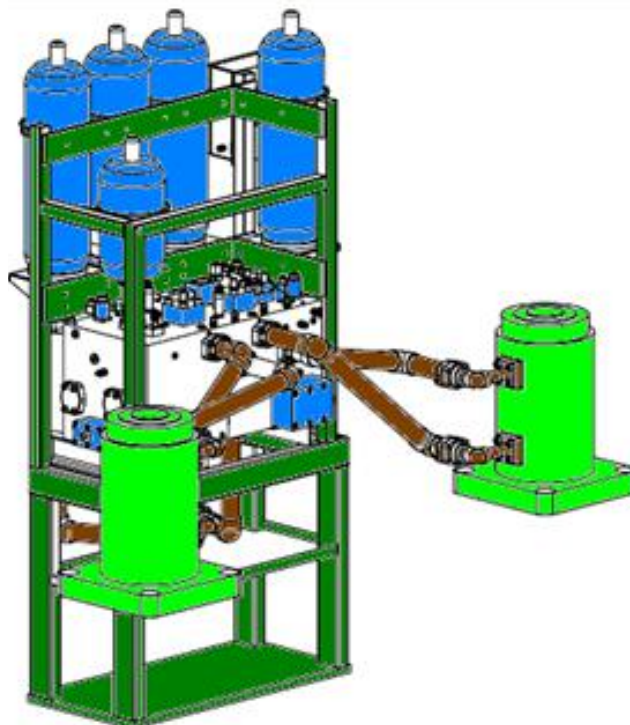


Figura 3. Painel de válvulas do circuito de aperto

4. DESCRIÇÃO DA FALHA DO CIRCUITO HIDRÁULICO

A primeira falha ocorreu dois meses após a modernização do LB3, que gerou uma parada de produção de 26 horas e a partir deste momento ocorreram mais cinco paradas totalizando 38 horas de equipamento parado. O efeito da falha para o operador era que o parafuso de aperto não funcionava, não se conseguia aplicar carga na cadeira de laminação. Após várias inspeções nos circuitos hidráulico e eletrônico e substituição de componentes, observou-se o agarramento dos elementos lógicos e da válvula de pilotagem. Observou-se também fratura na capa do êmbolo do cilindro *LO*, identificando assim o gerador de particulado que estava provocando agarramentos dos componentes. Nesta intervenção foi substituído o cilindro *LO*, a válvula de pilotagem, a servo-válvula e feita limpeza nos elementos lógicos. Os cilindros hidráulicos montados no equipamento tinham sido substituídos durante a modernização, entretanto havia a ocorrência de falha com apenas dois meses de funcionamento.

4.1. Análise da Falha do Cilindro hidráulico *LO*

Para o entendimento do processo de falha o cilindro hidráulico substituído foi desmontado para investigação da fratura da capa do êmbolo. Conforme mostrado na Fig. (4), houve fratura de parte da capa que reveste o êmbolo do cilindro, na extremidade do lado do cabeçote dianteiro em uma região coincidente (alinhada) com o pórtico de alimentação de óleo. Ocorreu a quebra de um segmento com dimensões próximas da parte interna do pórtico existente na camisa.

Uma observação na região fraturada permite afirmar que a quebra ocorreu na mudança de seção da capa do êmbolo (mudança de diâmetros internos), onde não há raio de concordância e adicionalmente foi usinado um dos canais externos na mesma direção da mudança de seção. Observaram-se também marcas de ferramenta de usinagem no diâmetro externo da capa. Dessa forma, tratava-se de uma região de elevada concentração de tensões. A Figura (5) mostra com detalhe a forma geométrica da capa do êmbolo.

Através de inspeção visual foram identificadas marcas localizadas nas buchas dos cabeçotes dianteiro e traseiro com defasagem próxima de 180°, que indicava desalinhamento do conjunto. Foram também identificadas marcas na superfície externa da capa do êmbolo com defasagem próxima de 120°, o que também indicava desalinhamento.

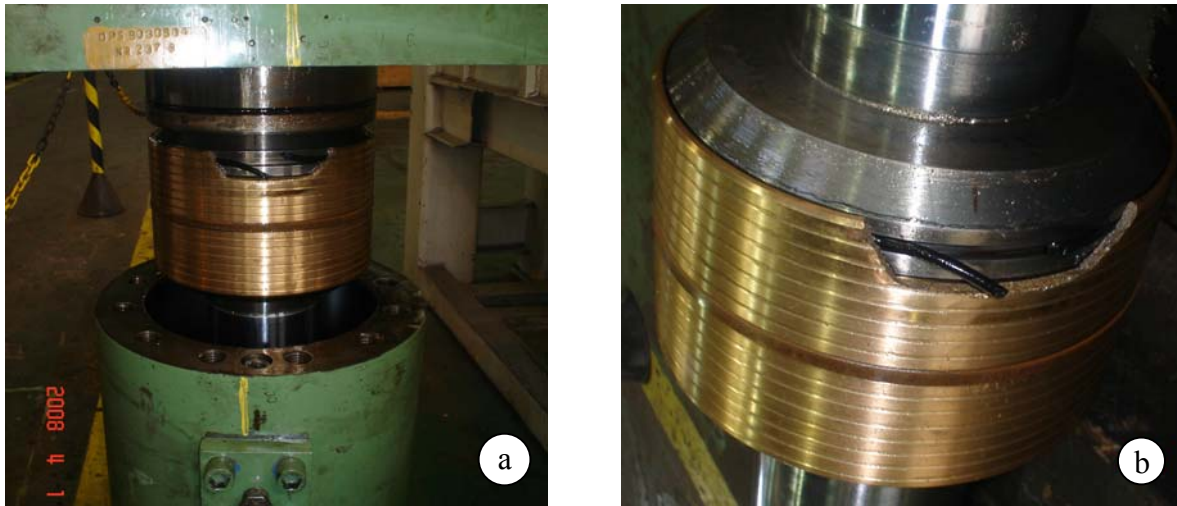


Figura 4. a - Posição da quebra, b - detalhe da quebra.

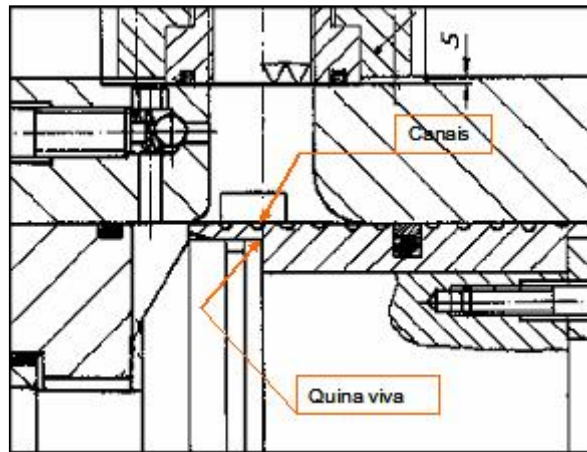


Figura 5. Detalhe da montagem da capa do êmbolo.

Foram montados os cabeçotes na camisa do cilindro e levado o conjunto a uma mandrilhadora para verificação de concentricidade entre os diâmetros internos das buchas dos cabeçotes e o diâmetro interno da camisa. A variação máxima encontrada foi de 0,05 mm, valor considerado baixo tendo em vista as tolerâncias de projeto de cilindro hidráulico H7/f7. Foi também feito levantamento dimensional das peças e o que chamou a atenção foi a dimensão da bucha do cabeçote dianteiro que apresentou variações acima do limite superior de tolerância de 0,3 mm. Os resultados estão apresentados na Fig. (6).

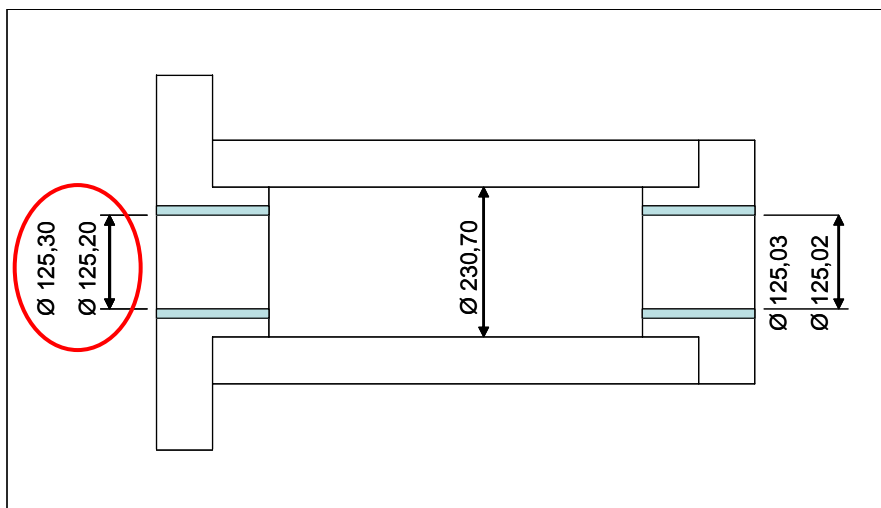


Figura 6. Tolerâncias dimensionais da camisa e buchas.

A haste do cilindro também foi inspecionada quanto à forma (empeno, concentricidade e cilindricidade) e identificada uma variação máxima de 0,42 mm, com o agravante que a flecha estava direcionada para o lado onde ocorreu a quebra. Foram também conferidos os diâmetros externos da capa do êmbolo que apresentou variação de até 0,15 mm e da haste que apresentou variação dentro dos limites de tolerância. Na Figura (7) são apresentados os resultados das medições feitas na haste do cilindro.

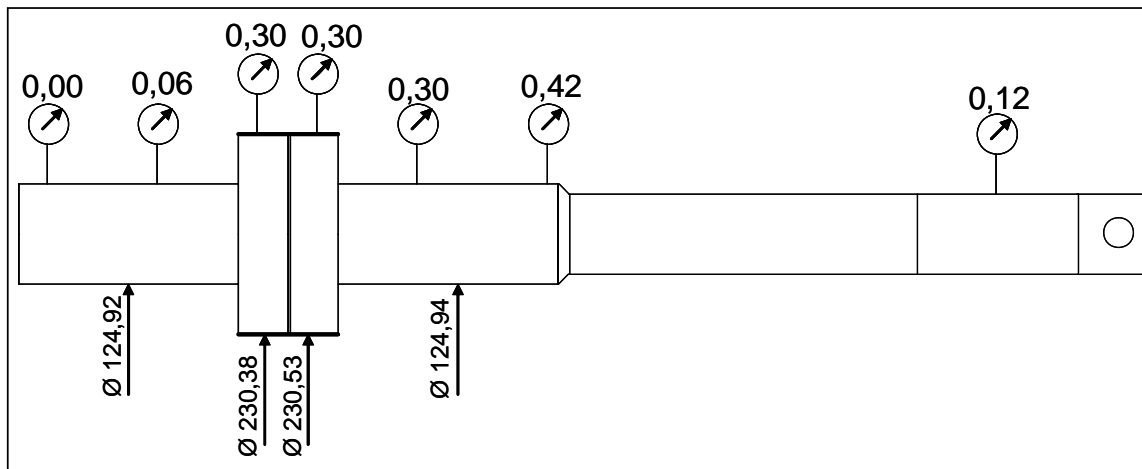


Figura 7. Tolerâncias de forma da haste e êmbolo.

Com base nos resultados dos levantamentos dimensionais e nas medições de forma do conjunto camisa, cabeçotes, haste e êmbolo, pode-se concluir que o desgaste apresentado na bucha do cabeçote dianteiro, as marcas existentes nas buchas dos dois cabeçotes e as marcas observadas na capa do êmbolo foram causadas pela forma irregular da haste e pela variação dimensional do diâmetro externo do êmbolo.

Diante da suspeita de deformação da haste em trabalho, foi feita uma verificação do dimensionamento da mesma, tendo em vista os esforços de flambagem. Segundo Exner et al (1991), a carga de flambagem é descrita pela Eq. (1). Isto é, acima desta carga a haste sofrerá flambagem.

$$K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{S k^2} \quad (1)$$

A carga máxima de trabalho pode ser escrita pela razão entre a carga de flambagem e um fator de segurança e é dada pela Eq. (2).

$$F = \frac{K}{S} \quad (2)$$

onde $S k$ é o comprimento de flambagem livre, E o módulo de elasticidade, J o momento de inércia e S o fator de segurança.

Os cálculos indicaram que a haste não se deformou em operação, uma vez que o coeficiente de segurança encontrado, diante do esforço de flambagem, foi superior a 10.

$$K = \frac{\pi^2 * 2,1 * 10^5 * \frac{\pi \cdot 110^4}{64}}{1545^2} \Rightarrow K = 6240260 N \quad (1)$$

$$F = \frac{6240260}{3,5} \Rightarrow F = 1782931 N \quad (2)$$

Força máxima no cilindro calculada na Eq. (3).

$$F_c = \frac{\pi}{4} (0,23^2 - 0,125^2) * 200 * 10^5 \Rightarrow F_c = 585514 N \quad (3)$$

Logo o fator de segurança de trabalho é calculado na Eq. (4).

$$S = \frac{K}{F_c} \Rightarrow S = \frac{6240260}{585514} \Rightarrow S = 10,65 \quad (4)$$

Foi realizada análise química do material fraturado e identificado que o material utilizado não correspondia à composição do bronze especificado no projeto do cilindro. Esta não conformidade gerou dúvidas sobre as propriedades mecânicas do bronze utilizado (alongamento percentual, Limite de resistência, dureza, etc).

Num primeiro momento, a causa da falha do cilindro foi atribuída às não conformidades citadas acima, mas durante inspeção no cilindro que substituiu o cilindro danificado, após 15 dias de operação observou-se novamente a falha na capa do êmbolo. Este segundo cilindro falhou da mesma forma que o anterior, e através das mesmas inspeções não apresentou as variações dimensionais encontradas no primeiro, não tinha empeno da haste, as dimensões das buchas, haste e camisa estavam dentro dos limites de projeto.

As análises foram retomadas e a principal causa passou a ser os picos de pressão gerados nos finais de curso do cilindro, em função da elevação de velocidade do parafuso de aperto. Na Figura (8) observa-se que o êmbolo bloqueia a saída de óleo antes de chegar ao final de curso, o que gera pico de pressão mostrado na área em destaque.

O cilindro que estava montado no lado de acionamento desde a modernização do sistema e que até então não havia falhado, foi desmontado para inspeção quando se observou que a capa do êmbolo apresentava sinais de fratura na mesma região de falha dos outros cilindros, indicando que a fratura total estava prestes a acontecer. Observando a Fig. (9), percebe-se que o calço hidráulico no final de curso do cilindro estava realmente ocorrendo durante a abertura rápida da cadeira, de forma que a capa de bronze era forçada no sentido de separá-la do corpo principal do êmbolo e no movimento de volta, para aplicação de carga, havia o tracionamento do material da capa. A falha funcional era só uma questão de tempo.

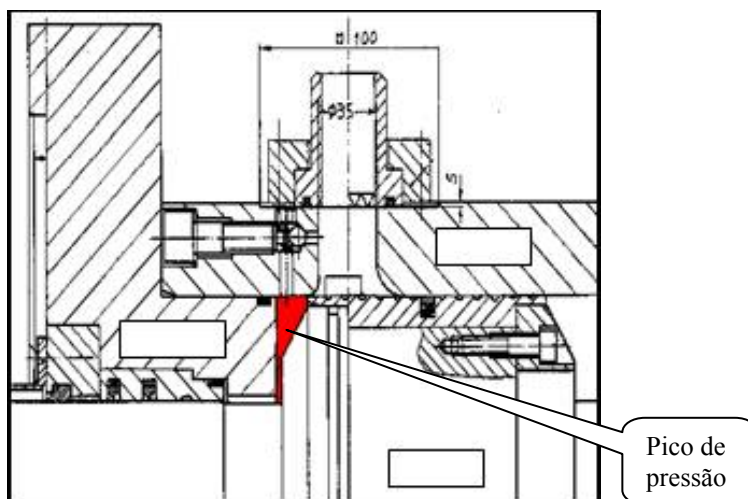


Figura 8. Pico de pressão no final de curso do êmbolo.

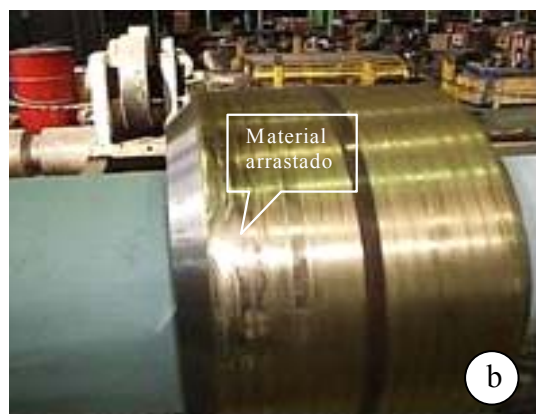


Figura 9. a - Abertura da capa do êmbolo, b - Arraste de material da capa

Foi então realizado um estudo do projeto do cilindro, utilizando para comparação os projetos dos outros laminadores, LB4 e LB2, os quais apresentam contextos operacionais similares ao do LB3. Baseado no resultado da

análise foi feita a substituição da capa de bronze do êmbolo por revestimento de bronze alumínio aplicado por soldagem diretamente sobre a superfície de aço, similar ao projeto do cilindro do LB4, sendo também alterada a geometria do êmbolo (inclinações das extremidades) de forma a evitar o calço hidráulico nos finais de curso do cilindro conforme mostrado na Fig. (10). Os dois cilindros reserva foram reparados conforme o projeto revisado e feita a substituição no equipamento.

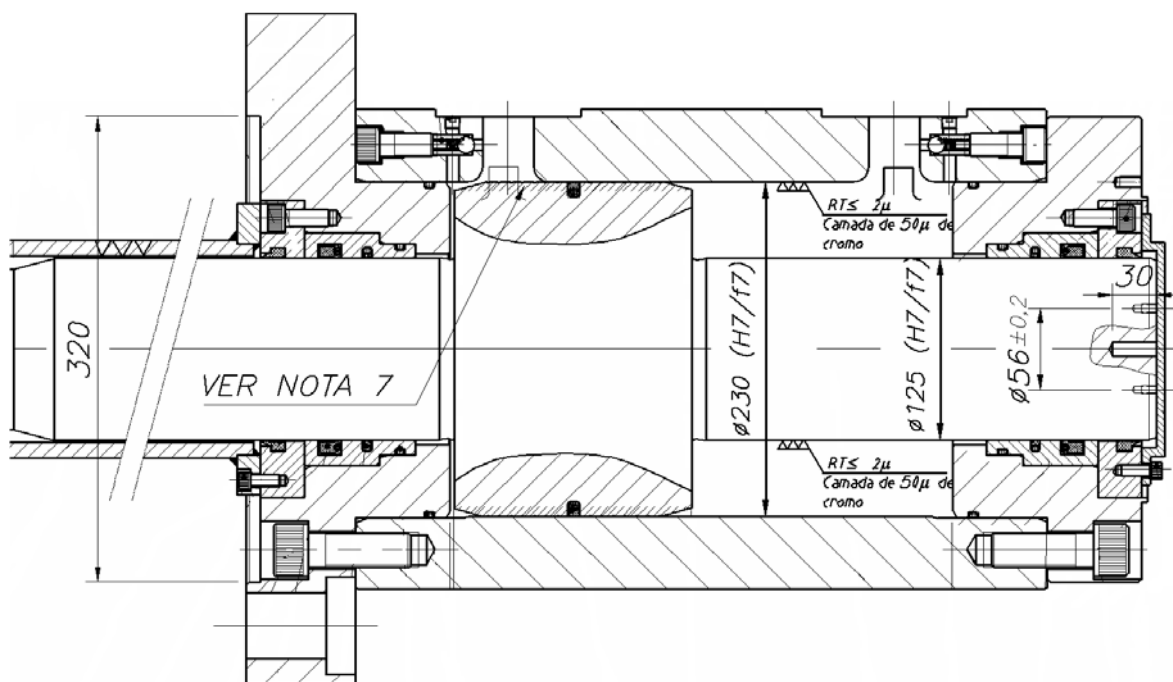


Figura 10. Detalhe do cilindro modificado.

5. ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E SEUS EFEITOS – FMEA

Tendo em vista as falhas ocorridas e a criticidade do sistema de aperto para o processo de laminação elaborou-se um FMEA para o sistema de acionamento do parafuso a fim de evitar, por meio da análise das falhas potenciais e as propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no sistema. Inicialmente foram definidas as funções e a localização de cada um dos componentes do circuito hidráulico que estão apresentados no diagrama da Fig. (3). Foram definidas cinco funções principais, as quais são apresentadas na Tab. (1).

Tabela 1. Funções e modos de falha do sistema hidráulico.

Funções Principais	Modos de Falha
1 - Suprir o painel de válvulas com óleo a uma pressão de 190 bar e vazão de 80 l/min.	13
2 - Possibilitar força de laminação até 16000 kN.	17
3 - Permitir o deslocamento apenas do cilindro hidráulico LO para troca dos rolamentos B e C.	3
4 - Possibilitar a abertura rápida da cadeira com tempo $\leq 0,3$ segundos.	11
5 - Possibilitar um deslocamento do parafuso de 13 mm no intervalo de 2,6 s, com sinal de degrau de 20 % na servo-válvula para fechar a cadeira e uma carga inicial de 7200 kN sem a tira.	15

Conforme Castro (2008), os modos de falha foram classificados pelo NPR, (Número de prioridade de risco) que é definido como o produto dos índices de severidade, ocorrência e detecção, ou seja, é uma medida de risco do processo.

Com a implementação das ações de prevenção/detecção definidas pelo grupo objetivou-se reduzir o NPR como forma de assegurar o cumprimento das funções. Definiram-se três faixas de NPR: baixa, média e alta prioridade.

Na Figura (11) são apresentadas as alterações no NPR referente a todos os modos de falha levantados para o sistema. Observa-se que houve redução dos valores de NPR de média e alta prioridade e uma elevação dos de baixa prioridade, que foi possível através das atividades preventivas/preditivas implantadas.

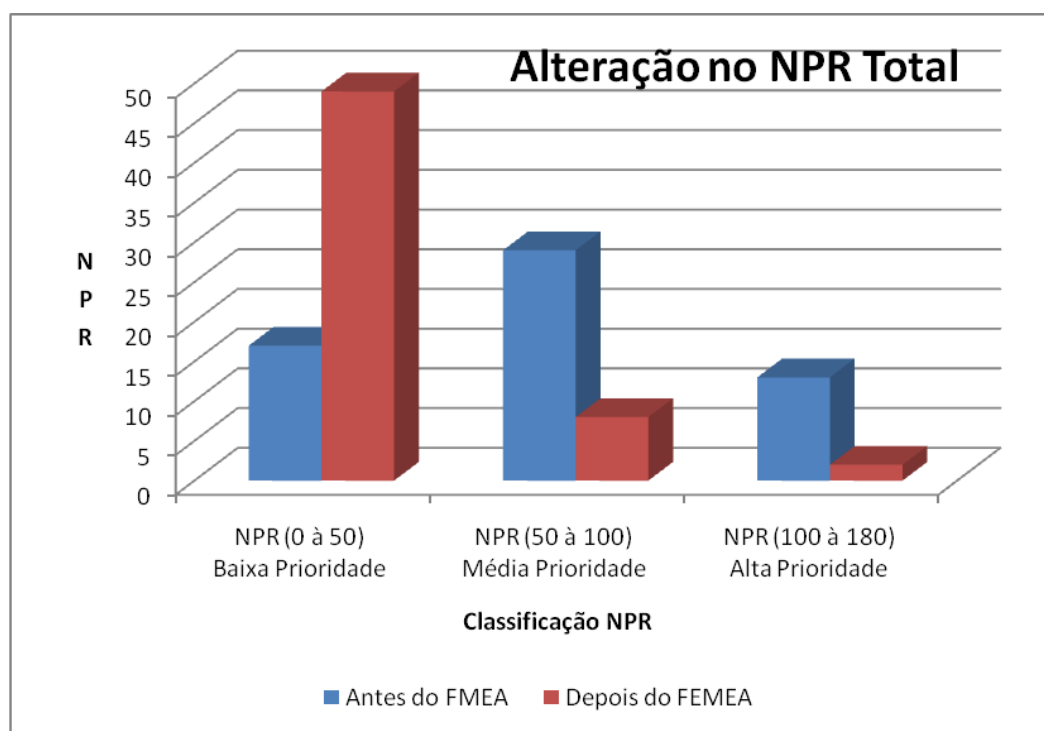


Figura 11. Alterações no NPR referente a todos modos de falha

6. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho uma análise de falha do sistema hidráulico do parafuso de aperto superior do LB3, que ocorreu em função da mudança no contexto operacional do sistema, essencialmente redução do tempo de abertura rápida da cadeira.

Após a implantação de novo projeto do cilindro hidráulico em junho de 2008, o qual eliminou os picos de pressão no final de curso, o sistema está operando de acordo com a especificação. Os acompanhamentos da vida dos filtros hidráulicos, bem como das análises do óleo, indicam que as alterações foram acertadas.

A principal falha apresentada neste trabalho foi a fratura da capa do êmbolo do cilindro hidráulico que passou a ser mais solicitada mecanicamente em função dos picos de pressão gerados no final de curso do cilindro.

A utilização da metodologia FMEA mostrou-se útil no processo de análise de falha, uma vez que foi possível identificar os modos de falha do sistema e prever ações pró-ativas para prevenir a falha ou diminuir seus efeitos. Além disso, para todos os modos de falha levantados, foram definidas atividades de detecção, de forma que a atividade de diagnóstico de falha é facilitada, logo, diante de qualquer falha com o sistema de aperto pode-se recorrer ao documento onde estão registradas tanto as medidas de detecção quanto de prevenção para os modos de falha levantados.

A identificação da causa raiz, apesar da maioria das vezes não ser possível, deve ser sempre objetivada e mesmo diante de evidências que direcionam para uma causa, deve-se questionar e avaliar outros modos de falha.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ArcelorMittal Inox Brasil pela cessão das informações e imagens.

8. REFERÊNCIAS

- Castro, D.E., 2008, “Análise de Falhas”, Abraman, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Exner, H., Freitag, R., Geis, I. H., Lang, R., Oppolzer, j., Schwab, P., Sumpf, E., Ostendorff, U., Reik, M., 1991 “Hidráulica, Princípios básicos e componentes da tecnologia dos fluidos”, Mannesmann Rexroth.
- T. Sendzimir, Inc., disponível em: <http://sendzimir.com>, acessado em dezembro de 2009.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

FAILURE ANALYSIS OF UPPER SCREWDOWN HYDRAULIC SYSTEM OF COLD ROLLING MILL MODEL SENDZIMIR

Antônio Carlos Ataíde, antonio-carlos.ataide@arcelormittal.com.br¹

Alexandre Moura Giarola, sr.giarola@gmail.com²

Paulo Roberto Cetlin, pccetlin@demet.ufmg.br²

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br²

¹ArcelorMittal Inox Brazil, Praça 1º de maio, 09, Centro, CEP 35180-018, Timóteo, Minas Gerais, Brazil

²Federal University of Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Campos Universitário, CEP 31270.901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

***Abstract.** The cold rolling mill number 3, LB3 from ArcelorMittal Inox Brazil has a screw down system which has the main function to apply rolling force to reduce the thickness of the strip. At the end of 2007 this system underwent a revamp when the speed of the hydraulic cylinders that makes the movement of screwdown was increased from 0.090 m/s to 0.600 m/s, and with that started to occur fracture of the sleeve that covers the hydraulic cylinder piston. It was found that the cause of fracture were the pressure peak generated at the end of cylinder stroke, involving high mechanical stress on the sleeve of the piston. Faced with this new operational context of the screwdown system and the consequences of failure, a new design for the hydraulic cylinder was developed in order to reduce the mechanical stress occurring at the end of cylinder stroke. Additionally was elaborated a FMEA (failure modes and effects analysis) for screwdown hydraulic system in order to prevent, through analysis of potential failures and proposals for improvement actions, that occurring failures in the system.*

***Keywords:** Hydraulic cylinder, screwdown, pressure peak.*