

AÇÕES DE CONTROLE PARA EVITAR O ROMPIMENTO DE PELE NAS MÁQUINAS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA ACIARIA 2 DA USIMINAS, USINA DE IPATINGA*

Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça¹
Rodrigo Seara Martins²
Everton Paço Cunha³
Johnny Dório Anastácio⁴

Resumo

São crescentes as exigências por confiabilidade nos processos siderúrgicos. Nesse contexto, a Usiminas tem direcionado esforços em suas aciarias na busca da melhoria contínua dos processos garantindo a maior estabilidade operacional. O lingotamento contínuo é responsável pela solidificação controlada do aço líquido. A solidificação inicia-se no molde pela formação de uma pele que sustenta o núcleo líquido ao longo da máquina. O rompimento dessa pele representa um dos maiores problemas no processo de lingotamento contínuo por vazar o aço líquido no interior do veio e atingir as partes eletromecânicas da máquina. Essa ocorrência oferece risco de dano às pessoas, promove a interrupção do lingotamento no veio, sucateamento de produtos e indisponibilidade momentânea do equipamento. Visando reduzir a frequência de rompimentos, a Usiminas repotencializou o sistema de exaustão de vapor, adequou o sistema de detecção de rompimento de pele e criou uma equipe multidisciplinar para análise de cada evento. Essas ações reduziram significativamente a frequência dos rompimentos de pele na Aciaria 2 da Usina de Ipatinga, a ponto de registrar 539 dias sem esse evento.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Rompimento de pele; Estabilidade operacional.

CONTROL ACTIONS TO AVOID BREAKOUT IN CONTINUOUS CASTING MACHINES AT STEELMAKING SHOP 2 OF USIMINAS, IPATINGA WORKS

Abstract

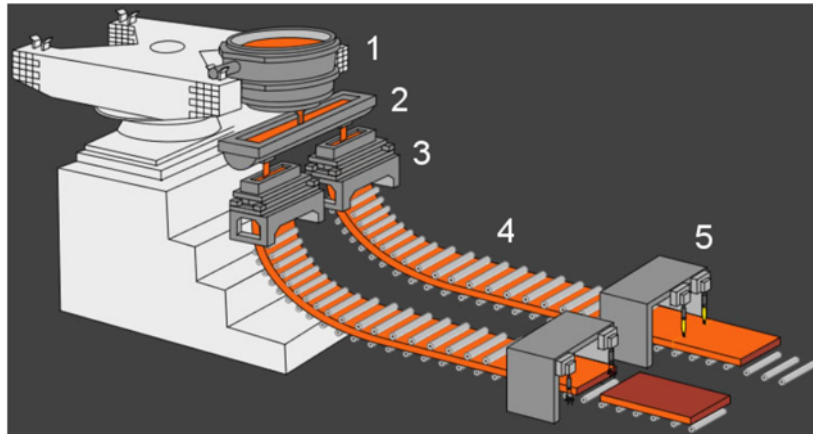
In steelmaking process, the demands for reliability are always increasing. In this context, Usiminas has directed its efforts at the steelmaking plants in a way to continuous improvement of processes ensuring greater operational stability. The continuous casting is responsible for the controlled solidification of liquid steel. The solidification begins in the mold where a skin, which sustain the liquid through the machine, is formed. Breakout of this skin is the most important problem in continuous casting process. The liquid steel breaks the solid skin and leak to the strand reaching the electromechanical parts of the machine, offering risks to the workers, may interrupt the sequence, generate scrap and stop the equipment for a while. In order to reduce the frequency of breakouts, Usiminas has adjusted the power of the steam exhaust system, adjusted the breakout detection system and created a multidisciplinary team to analyze each event. These actions have significantly reduced the frequency of Breakout in Steelmaking plant 2 at Ipatinga. The record was 539 days without Breakout.

Keywords: Continuous casting; Breakout; Operational stability.

- ¹ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia Extrativa, CQE/ASQ, Engenheiro de Produção Sênior, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
- ² Engenheiro Mecânico, Pós-Graduação em Metalurgia, Engenheiro de Produção Pleno, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
- ³ Engenheiro de Materiais, Gerente, Gerência de Lingotamento, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
- ⁴ Engenheiro Mecânico, Coordenador de Manutenção, Gerência de Manutenção de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O método mais eficiente e produtivo para solidificar os aços na siderurgia é o lingotamento contínuo. No contexto da aciaria, o lingotamento contínuo é responsável pela solidificação controlada do aço líquido, garantindo o acerto dimensional e o atendimento de qualidade superficial e interna de placa. Na Figura 1 é ilustrada a máquina de lingotamento contínuo de forma esquemática.



1. Panela; 2. Distribuidor; 3. Molde; 4. Rolos de suporte e extratores; 5. Máquina de corte de placas.

Figura 1. Desenho esquemático da máquina de lingotamento contínuo [1].

Para iniciar a solidificação, o aço líquido é vazado para o interior de um molde de cobre, com revestimento de níquel, refrigerado por água. Dentro do molde, o aço inicia a solidificação devido ao contato com a parede do molde, formando uma fina camada sólida denominada pele.

Nesta etapa do processo é utilizado o pó fluxante para evitar o contato direto da pele de aço com o molde, que por sua vez controla o fluxo de calor no molde, o atrito entre aço/molde e o agarramento dessa pele. Além disso, o molde é oscilante, para evitar o agarramento da pele solidificada na superfície da parede do molde.

Ao sair do molde, a pele deve suportar a pressão ferrostática do aço líquido no interior da placa. Caso contrário, ela se romperá na saída do molde e o aço líquido presente no interior da placa vazará e danificará os componentes da máquina, tais como, rolos, bicos de spray e outros conjuntos mecânicos. Esse fenômeno do vazamento do aço líquido do interior da placa é denominado *breakout* [1] ou rompimento de pele.

O *breakout* causa problemas graves à área produtiva, implicando em perda de produção e risco à segurança das pessoas envolvidas. O *breakout* pode ser causado por desvios de natureza procedimental, operacional, qualidade das matérias-primas ou por falhas eletromecânicas do equipamento. Para reduzir a chance desse evento, o uso de Sistema de Detecção de *Breakout* (SDB), ou *Breakout Detection System*, é aplicado com êxito, como na Máquina de Lingotamento nº3 da Usiminas Cubatão, desde que bem dimensionado e ajustado aos parâmetros metalúrgicos do processo. O SDB associa o comportamento das temperaturas do molde, medidas por termopares, a um padrão treinado no sistema. Se os critérios de definição do *breakout* são atingidos, o alarme é disparado e a máquina de lingotamento reduz automaticamente a sua velocidade de operação para uma condição segura.

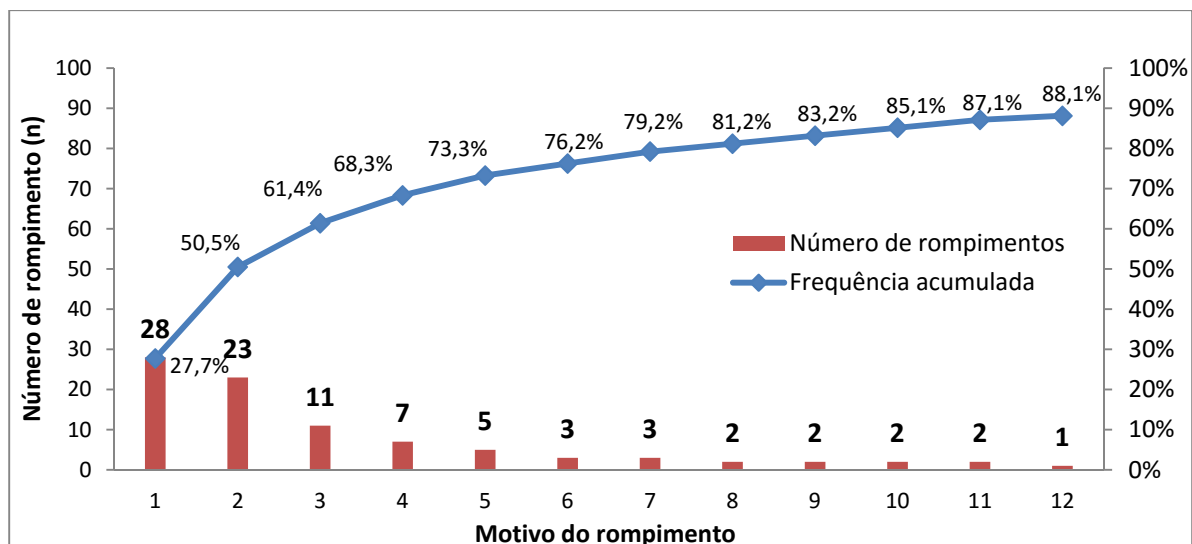
Em geral, indiferente do tipo de aço, busca-se a condição mais estável da velocidade de lingotamento, para o atendimento ao plano de produção e manutenção da qualidade. Em função da redução de velocidade imposta pelo Sistema de Detecção de *Breakout*, alguns produtos têm sua qualidade e dimensional comprometido, como o duplo lingotamento, por exemplo, que resulta na sobreposição de peles de aço no molde, no momento da redução severa de velocidade, o que normalmente leva a um descarte de parte do produto para eliminar essa imperfeição na placa. Em particular, os eventos de redução de velocidade por alarmes verdadeiros são benéficos por evitar rompimentos de pele. Já para os alarmes falsos, as reduções são desnecessárias e altamente indesejáveis por causarem efeitos deletérios à qualidade do aço.

Para alarmes classificados como falsos (ação do SDB sem risco de *breakout*), o ajuste do sistema de detecção é necessário para evitá-los, mas para isso algumas evidências devem ser levantadas para classificar a natureza do alarme. A análise da regularidade das marcas de oscilação, avaliação da existência ou não de regiões lisas na superfície da placa e/ou marcas que lembram cicatrizes fazem parte do processo de investigação da veracidade do alarme. Esse julgamento busca medir a qualidade da resposta do SDB e, se necessário, propor ajustes para aumentar a sua eficiência de detecção evitando alarmes falsos.

Neste contexto, o presente trabalho discute as ações que conduziram a uma menor ocorrência de rompimentos de pele na Aciaria 2 de Ipatinga, pela ação da repotencialização dos sistemas de exaustão, melhoria de desempenho do Sistema de Detecção de *Breakout* e redução dos alarmes falsos durante a fabricação de aços.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As Máquinas de Lingotamento 1 e 2, da Aciaria 2, da Usiminas Ipatinga foram fabricadas pela Hitachi Zosen Corporation com tecnologia da Demag e Mannesmann. Ambas entraram em operação em 1976, cada uma com dois veios, e tiveram a primeira reforma em 1997 e 1999, respectivamente, alterando a concepção de curvas para verticais-curvas e introduzindo o Sistema de Detecção de *breakout*. Mesmo após as reformas, esses equipamentos continuaram a receber melhorias e ajustes ao longo dos anos para o controle de rompimentos de pele, e alguns serão mencionados nesse trabalho. Na Figura 2 é apresentado graficamente o resumo dos principais rompimentos de pele entre os anos de 2001 a 2011.



Motivo: 1. Agarramento de pele no molde/falha do Sistema de Detecção de *Breakout*; 2. Trinca longitudinal; 3. Perda de conicidade; 4. Penetração de aço entre faces no molde; 5. Variação brusca de nível do aço no molde; 6. Alta temperatura; 7. Despreendimento de refratário; 8. Arraste de material não metálico; 9. Variação de largura; 10. Falha no sistema de oscilação; 11. Falha operacional; 12. Desvio no pó fluxante.

Figura 2. Diagnósticos dos rompimentos de pele de 2001 a 2011 nas Máquinas de Lingotamento 1 e 2 da Aciaria 2 da Usiminas Ipatinga.

Como observado nessa Figura 1, as ocorrências mais representativas são:

- Agarramento de pele no molde/falha do Sistema de Detecção de *Breakout* (com 27,7% do peso);
- Trinca longitudinal em placa (com 22,8% do peso).

Grande parte desses eventos foram afetados pela deterioração das características do pó fluxante no molde.

2.1 Sistema de Exaustão de Vapor

Desde a reforma das máquinas, o sistema de exaustão de vapor apresentava baixa eficiência de sucção, por consequência, vapor no molde durante o lingotamento. O que agravou-se com o passar dos anos. Esse vapor despreendido, ao encontrar a superfície fria do molde, condensava-se e umidificava o pó fluxante a ponto de molhar e criar incrustações na face do molde e/ou pelotas, condição essa que pode alterar o desempenho térmico da escória do fluxante [2] e potencializar a formação de trincas longitudinais em placa. Pontualmente eram observados picos de umidade nas pelotas de até 24%, teor esse indevido para um processo estável e seguro de lingotamento. Para resolver essa questão, foi desenvolvido um novo projeto de repotencialização do sistema de exaustão, onde o ventilador principal teve aumento da capacidade de exaustão, sendo exclusivamente direcionado ao molde, um novo ventilador de maior capacidade para atender a duas novas tomadas de vapor, uma próxima ao desencurvamento e outra na região reta do veio. Na Figura 3 é apresentado esquematicamente a modificação construtiva realizada no corpo das Máquinas de Lingotamento 1 e 2, para aumentar a capacidade de sucção de vapor.

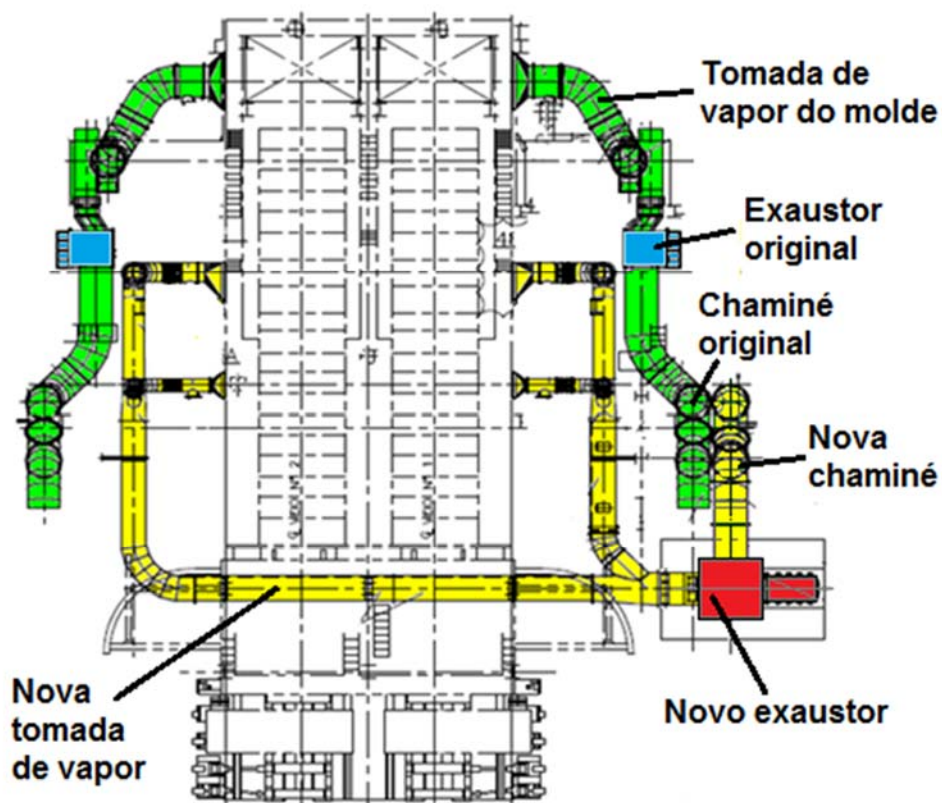


Figura 3. Vista superior das linhas de exatção de vapor das Máquinas de Lingotamento 1 e 2 da Usiminas Ipatinga.

Na Tabela 1 é apresentada as principais características do sistema de exatção.

Tabela 1. Ajustes do sistema de exatção

Características gerais do sistema	Circuito Original	Circuito Ajustado	
		Dedicado ao Molde	Parte Retra (Circuito complementar)
Número de Ventiladores	1	1	1
Pontos de captação de vapor	2	1	2
Vazão (m ³ /min)	100%	100%	89%
Rendimento do motor (%)	100%	100%	138%
Potência do motor (kW)	100%	100%	118%
Temperatura do vapor (°C)	Inalterado	Inalterado	
Pressão estática total (mmca)	Inalterado	Inalterado	

Estudos de Masashi [3] informam que o teor de água no pó fluxante aumenta a tendência de rompimento de pele pelo mecanismo de agarramento.

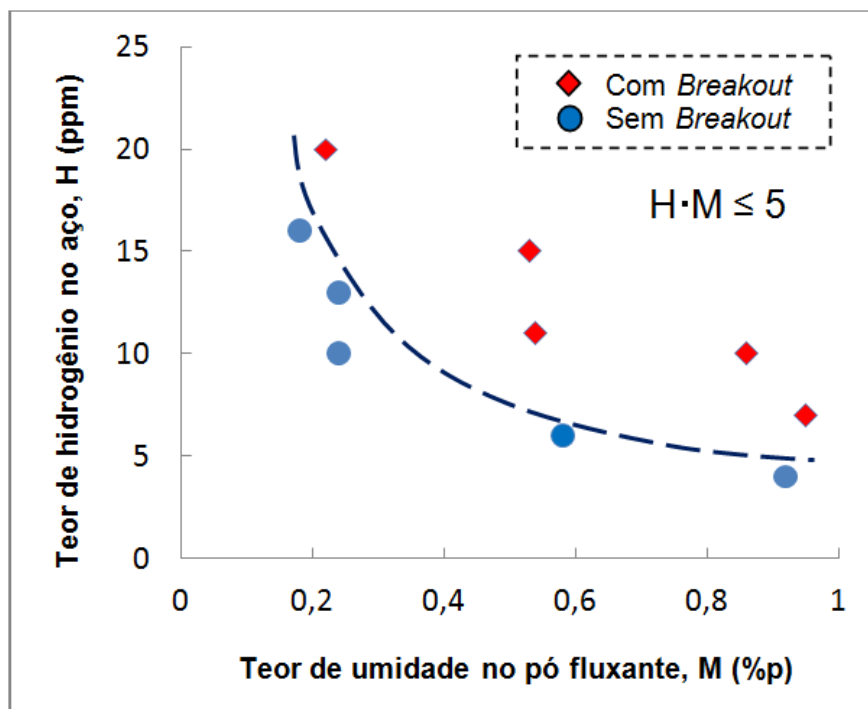


Figura 4. Relação entre a umidade do pó fluxante e o teor de hidrogênio no aço e a chance de *Breakout* [2].

Na Figura 4 é informado que o agarramento de pele no molde não é observado quando o produto da umidade do pó fluxante (M) pelo teor de hidrogênio no aço líquido (H) é menor ou igual a cinco ($H \cdot M \leq 5$), para as condições de processo da planta Sumitomo Metal. Desta forma, mesmo que o hidrogênio do aço esteja na ordem de 20ppm, se a umidade do pó fluxante estiver sobre controle (menor que 0,20%), a chance de rompimento de pele por agarramento é reduzida. A recíproca também é válida, ou seja, um teor de hidrogênio menor ou igual a 9ppm no aço tolera uma umidade de até 0,50% em peso (que em geral, é o teor máximo de umidade por especificação dos fluxantes aplicado na Usiminas Ipatinga). Essa informação sustenta a importância do controle rigoroso do teor de umidade do pó fluxante, desde a aquisição até a sua aplicação no molde.

2.2 Sistema de Detecção de *Breakout*

O Sistema de Detecção de *Breakout* da Usiminas Ipatinga possui três lógicas de alarmes: superfície, agarramento e penetração. A lógica de superfície monitora a homogeneidade térmica próxima ao menisco (linha de aço líquido que faz interface com o pó fluxante) do molde. A lógica de agarramento refere-se a adesão da superfície da pele solidificada de aço com a superfície da placa de cobre no molde, e a lógica de penetração avalia uma possível ruptura da quina da placa na jaqueta (face estreita) do molde.

Analisando os dados da Figura 2 constatou-se que a lógica de agarramento apresentava deficiência, de forma que aproximadamente 27,7% dos rompimentos de pele no período de 2001 a 2011 eram por esse motivo. Desta forma, foi necessário atuar no sistema, alterando a metodologia de classificar o evento e a lógica de atuação. Originalmente tinha-se um sistema de controle das variações de temperatura no molde baseado em carta de controle, com limites calculados dinamicamente levando em consideração poucas amostras do processo, que

apresentava deficiência na análise de tendência, e quando o sistema descaracterizava o evento, ele voltava ao comportamento normal de julgamento. Esse método foi alterado para um sistema com uma função pré-estabelecida autoadaptativa, baseado em máquina de aprendizado que identifica o comportamento da curva característica de agarramento, a qual deve identificar cinco estágios, conforme apresentado pela sequência de letras (c-u-r-v-a) na Figura 5. Os últimos dois estágios dessa curva (v-a) ditam a sensibilidade do alarme, e durante a ativação dos estágios, se o alarme não se confirmar, a lógica não mais retorna a origem, mas sim a um passo anterior em sua sequência de ativação, e assim sucessivamente, até voltar a condição de monitoramento

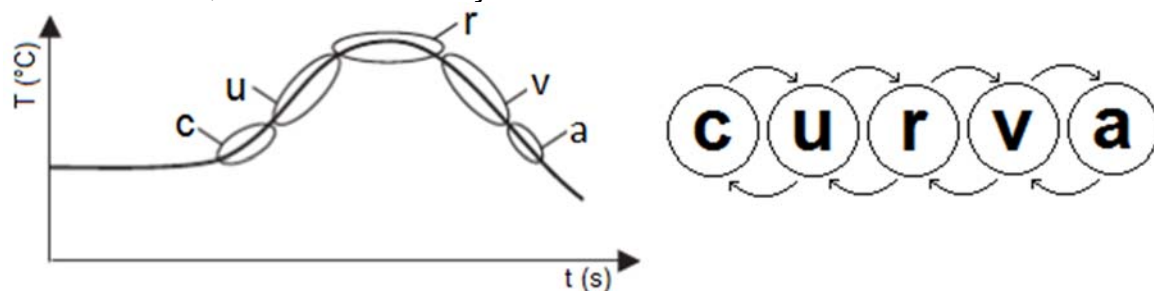


Figura 5. Associação entre a curva característica e agarramento de pele e as suas respectivas regiões de controle [1].

2.3 Ações do Grupo de Prevenção de Rompimento de Pele

Cada rompimento de pele é analisado e discutido entre as equipes de Operação, Manutenção, Técnica, Automação, Instrumentação e Pesquisa para encontrar a causa raiz da ocorrência. Dessa análise são apresentadas ações de controle para evitar reincidência do evento. Mesmo sem ocorrência de *Breakout*, o Grupo de Prevenção de Rompimento de Pele se reúne periodicamente para acompanhar e avaliar a efetividade das ações propostas por essa equipe multidisciplinar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

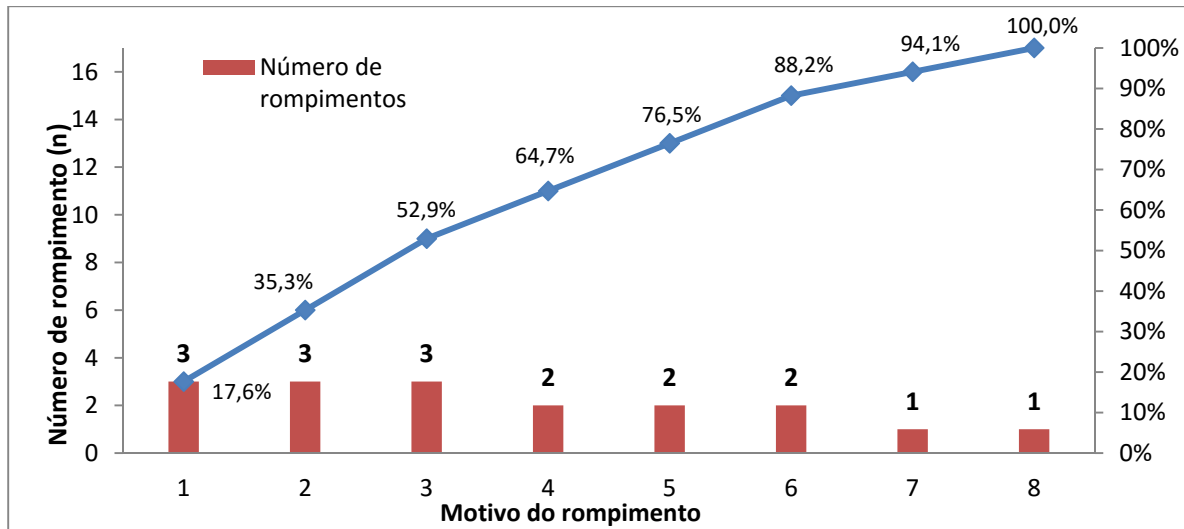
3.1 Efeito Combinado dos Sistemas de Exaustão e de Detecção de *Breakout*

Com a entrada do sistema de exaustão ajustado em novembro de 2011, a presença de vapor de água no molde mostrou-se controlada. Desta forma, o pó fluxante manteve a sua umidade próxima à especificação, garantindo o seu desempenho previsto. Com base nesse fato, o agarramento de pele no molde induzido pela degradação das características originais do pó fluxante foi reduzida, pela manutenção do produto entre o teor de umidade do pó fluxante versus teor de hidrogênio no aço, pela fundamentação exposta na discussão da Figura 3.

A lógica de agarramento do Sistema de Detecção de *Breakout* teve seu princípio de funcionamento alterado em fevereiro de 2010. E desde então vem passando por ajustes e melhorias de sensibilidade para atuar em ocorrências de alarmes verdadeiros e evitar alarmes falsos.

Com a combinação das melhorias do sistema de exaustão e da lógica de agarramento do SDB, não houve mais ocorrências de rompimentos de pele em molde 252mm pelo mecanismo de agarramento em condições normais de operação de novembro de 2012 a abril de 2016. O único evento de agarramento seguido de *breakout* está relacionado ao molde de 200mm de espessura. O SDB

até esta ocorrência passava por ajustes em sua parametrização, devido à baixa frequência de registros desse desvio operacional para molde dessa espessura. Na Figura 6 é apresentado o gráfico de Pareto com os rompimentos de pele para o período de Janeiro de 2012 a abril de 2016.



Motivo: 1. Trinca longitudinal; 2. Perda de conicidade; 3. Penetração de aço entre faces no molde; 4. Desprendimento de alumina do tampão; 5. Falha mecânica; 6. Falha operacional; 7. Alta temperatura; 8. Agarramento de pele no molde/falha do Sistema de Detecção de *Breakout* em molde 200mm.

Figura 6. Diagnósticos dos rompimentos de pele de janeiro de 2012 a abril de 2016 nas Máquinas de Lingotamento 1 e 2 da Aciaria 2 da Usiminas Ipatinga.

Na Figura 6 é mostrado que o evento de agarramento de pele no molde, que era o motivo mais relevante na Figura 2, reduziu drasticamente. Como o fluxante passou a ter sua característica físico-química preservada no molde, é natural que o evento relativo à trinca longitudinal seja reduzido, trazendo impacto positivo para o controle de rompimentos nas Máquinas de Lingotamento 1 e 2 da Aciaria 2 de Ipatinga. Não somente as ações de ajuste dos sistemas de exaustão e SDB foram responsáveis por esse resultado, a disciplina operacional dos operadores e o atendimento ao plano de manutenção, aliado as reuniões do Grupo de prevenção de *Breakout* foram aspectos fundamentais para esse resultado. A frequência anual de *Breakout* para o período de 2008 a 2015 pode ser vista na Figura 7.

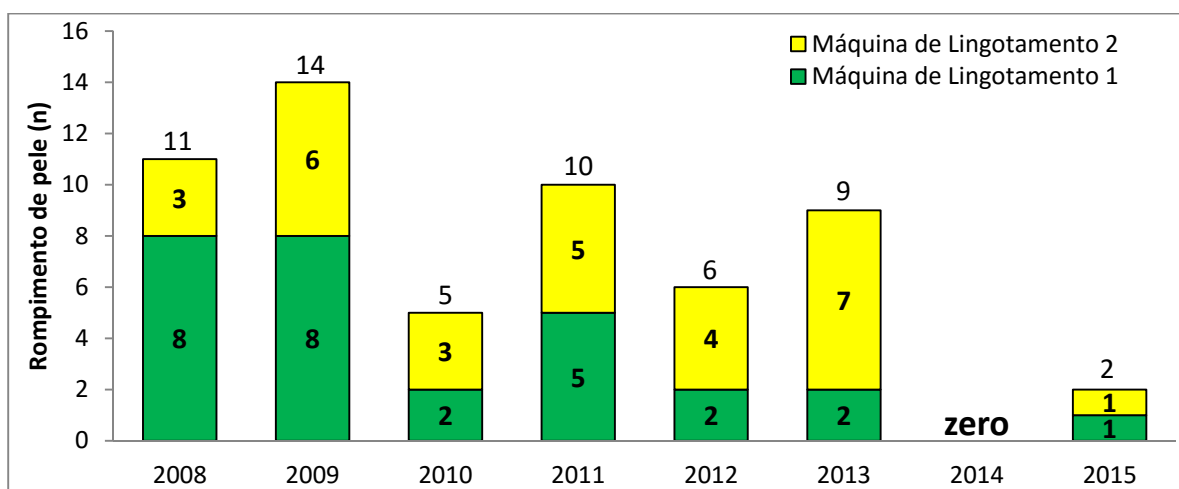


Figura 7. Rompimentos de pele entre os anos de 2008 a 2015 nas Máquinas de Lingotamento 1 e 2.

Em particular, as Máquinas de Lingotamento 1 e 2 da Aciaria 2 de Ipatinga ficaram entre 28/12/2013 até dia 20/06/2015 sem rompimento de pele, ou seja, um período de 1 ano, 5 meses, 23 dias (ou 539 dias) sem rompimento de pele, o melhor resultado dessas máquinas com índice de funcionamento normal, conforme mostrado na Figura 8. Fato esse de grande importância em função do baixo sequencial médio de oito corridas por série, inúmeras variações de largura de placa na mesma série e ao mix complexo de produtos nessa aciaria. O alto grau de compromisso entre as áreas envolvidas conduziram a esse resultado, onde a manutenção desse resultado é fortemente afetada pela disciplina operacional e da continuidade das ações.

Na Figura 8 é apresentada a produção dessas máquinas de lingotamento em termos percentuais, em relação à média de produção nos anos de 2008 a 2015.

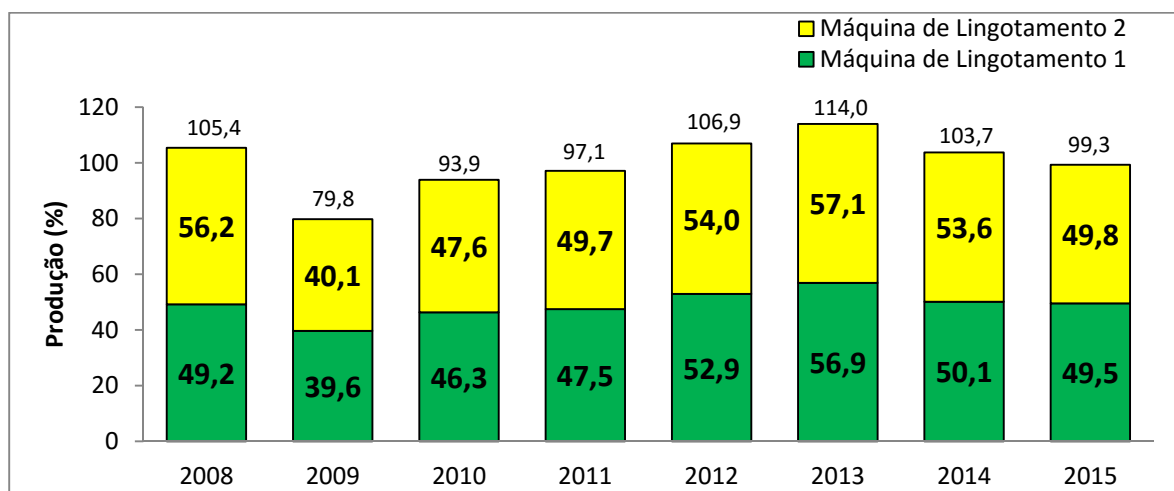


Figura 8. Produção das Máquinas de Lingotamento contínuo 1 e 2 entre os anos de 2008 a 2015.

Além das ocorrências do *Breakout*, a produção na aciaria é diretamente afetada por outros fatores como mercado e mix de produto.

4 CONCLUSÃO

Com base nas ações de aumento da capacidade do sistema de exaustão de vapor das Máquinas de Lingotamento 1 e 2, e do ajuste da lógica de agarramento do Sistema de Detecção de *Breakout* do molde, foi possível reduzir a frequência dos *Breakouts*, e desta forma, registrar 539 dias sem esse evento. Tal fato também foi sustentado pela atuação da equipe multidisciplinar para analisar e desenvolver ações de controle para os *Breakouts*, somada a disciplina operacional para atender aos procedimentos de preparação e manutenção das máquinas de lingotamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos profissionais:

- Fabrício Domith Rodrigues, pelo desenvolvimento da nova base metalúrgica da lógica de agarramento do Sistema de Detecção de *Breakout*;
- Fábio Loureiro Moreira, pela dedicação à coordenação do Grupo de Prevenção de *Breakout* da Usiminas Ipatinga;

- Fernando Marcos Andrade de Resende, Gilberto Henrique dos Reis Marçal e Daniel Lúcio de Souza Borba, pelo desenvolvimento do software do Sistema de Detecção de *Breakout* baseado em máquina de aprendizagem;
- José Raposo Barbosa, pelas soluções em instrumentação para um *feedback* estável e preciso dos termopares do Sistema de Detecção de *Breakout*;
- Leonardo José Silva de Oliveira, André Afonso Nascimento e Rafael Fernandes Reis, do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, pelas inúmeras contribuições técnicas;
- Hiroaki Iiboshi, da Gerência de Engenharia e Tecnologia Operacional, pelas discussões técnicas e trocas de experiências;
- Por fim, a todos os participantes das áreas de operação e manutenção que abraçaram o projeto, representados aqui por Carlos Alexandre Machado, Caiser Antônio Cunha dos Reis e Leandro Vilas Boas Fantini.

REFERÊNCIAS

- 1 Borba, DLS, Caminhas WM, Resende FMA, Marçal GHR, Rodrigues FD. Detecção de falhas no processo de lingotamento contínuo utilizando máquina de aprendizado e autômato finito. X SABI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São João Del Rei. Set. 2011; p. 839-844.
- 2 Kajitani T, Kato Y, Harada K, Saito K, Harashima K, Yamada W. Mechanism of a hydrogen-induced sticker breakout in continuous casting of steel: influence of hydroxyl ions in mould flux on heat transfer and lubrication in the continuous casting mould. ISIJ International. 2008;48(9):1215-1224.
- 3 Masashi H, Masayuki K, Sukehisa K. Method for continuously casting steel; Sumitomo Metal Ind Ltd, Application number: 2000-141739, Publication number: 2001-321909; Date of filing: 15.05.2000, Date of publication of application: 20/11/2001.