

SISTEMA DE DETECÇÃO E PREVENÇÃO DE *BREAKOUTS* EM LINGOTAMENTO CONTÍNUO UTILIZANDO APRENDIZAGEM DE MÁQUINA¹

Daniel Lúcio de Souza Borba²
Fernando Marcos Andrade de Resende³
Fabricio Domith Rodrigues⁴
Gilberto Henrique dos Reis Marçal⁵
Walmir Matos Caminhas⁶

Resumo

No lingotamento contínuo o aço líquido é vazado em um molde onde forma-se uma fina camada solidificada, que cresce em espessura à medida que o calor é extraído do aço ao longo do molde. Ao sair do molde essa camada pode se romper causando o vazamento do aço líquido, fenômeno chamado de *breakout*. Este trabalho propõe um sistema de detecção de *breakouts* por agarramento, baseado em aprendizagem de máquina. O sistema transforma a distribuição espacial-temporal de temperaturas do molde em uma escala chamada *breakoutability*, que mapeia a trajetória de tendência de *breakout*. O sistema foi validado com dados históricos e os resultados preliminares do funcionamento *on-line* apontam para a sua implantação.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Detecção de *breakout*; Aprendizagem de máquina.

BREAKOUT DETECTION SYSTEM FOR CONTINUOUS CASTING BASED ON MACHINE LEARNING APPROACH

Abstract

In continuous casting molten steel is poured out to a mold and a thin solid layer is formed, increasing in thickness as the heat is removed from steel along the mold. As soon as the slab leaves the mold the solid layer can break causing the phenomena called breakout. This work presents a breakout detection system based on machine learning approach. The system maps the mold temperature distribution into a probability of breakout, called "*breakoutability*". Historical data has been used to validate the system and first results of on line operation indicate that this new approach is going to substitute the existing system.

Key words: Continuous casting; Breakout detection; Machine learning.

¹ Contribuição técnica ao 13º Seminário de Automação de Processos, 7 a 9 de outubro de 2009, São Paulo, SP.

² Engenheiro Eletricista, UFMG.

³ Analista de Sistemas de Automação, Superintendência de Manutenção da Usiminas, Ipatinga, MG.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Superintendência de Aciaria da Usiminas, Ipatinga, MG.

⁵ Assistente Industrial, Superintendência de Manutenção da Usiminas, Ipatinga, MG.

⁶ Engenheiro Eletricista, Dr., Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, MG.

1 INTRODUÇÃO

O lingotamento contínuo consiste em transformar o aço líquido em placas de formato retangular através de um molde de cobre que retira o calor do aço líquido por meio de um sistema de refrigeração. Enquanto o aço percorre o molde, forma-se uma fina camada solidificada chamada “Pele” e sua espessura aumenta à medida que o calor é extraído do aço ao longo do molde. Conforme a placa é formada, seu interior permanece líquido sendo sustentado pela “Pele”, que pode romper por diversos motivos, causando assim o vazamento do aço líquido, fenômeno chamado de *breakout*.

Para prevenir *breakouts* por agarramento existem vários tipos de sistemas, chamados BDS (*Breakout Detection System*). Alguns são baseados em modelos puramente determinísticos, que não levam em conta as características de cada tipo de aço, e outros em modelos auto-adaptativos, que se ajustam ao tipo de aço, observando seu comportamento. Esse trabalho propõe um BDS auto-adaptativo baseado em máquina de aprendizado, capaz de detectar *breakouts* para a atual necessidade da Usiminas. A idéia básica do sistema é transformar a distribuição espacial-temporal de temperaturas no molde em uma escala chamada *breakoutability*, que mapeia a trajetória de tendência de *breakout* dentro do molde, assim como proposto por Bhattacharya et al.⁽¹⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

O modelo do comportamento é gerado com base na análise dos componentes principais que compõe as curvas de temperaturas do molde, utilizando uma máquina de aprendizado, também chamada de Analisador de Comportamento e Detector de Novidade. Esta máquina analisa os componentes principais de uma janela de temperaturas, estabelecendo uma “região de comportamento normal”. A partir dessa primeira análise, todos os novos conjuntos de temperaturas apresentados ao sistema são analisados e classificados como normais ou novidades. Para ser considerado como novidade, o novo conjunto de dados deve apresentar certo desvio em relação a uma região de comportamento normal, recebendo o nome de perturbação. Essa técnica de detecção de novidade é chamada de Classificação de uma Classe.⁽²⁾

A Figura 1 mostra uma análise dos componentes principais do comportamento da temperatura para um lingotamento no qual ocorreu o *breakout*. Nela observa-se a separação entre a região de comportamento normal (pontos) e o comportamento durante o *breakout* (cruzes).

Detectada uma novidade no comportamento da temperatura, as informações sobre os componentes principais e sua respectiva perturbação são enviadas a um Detector de *Breakout*, responsável por determinar se o comportamento anômalo é ou não um comportamento de *breakout*. Para isso, ele separa a curva característica de *breakout* em regiões e as associa a símbolos (Figura 2), como o proposto por Kempf e Adamy.⁽³⁾

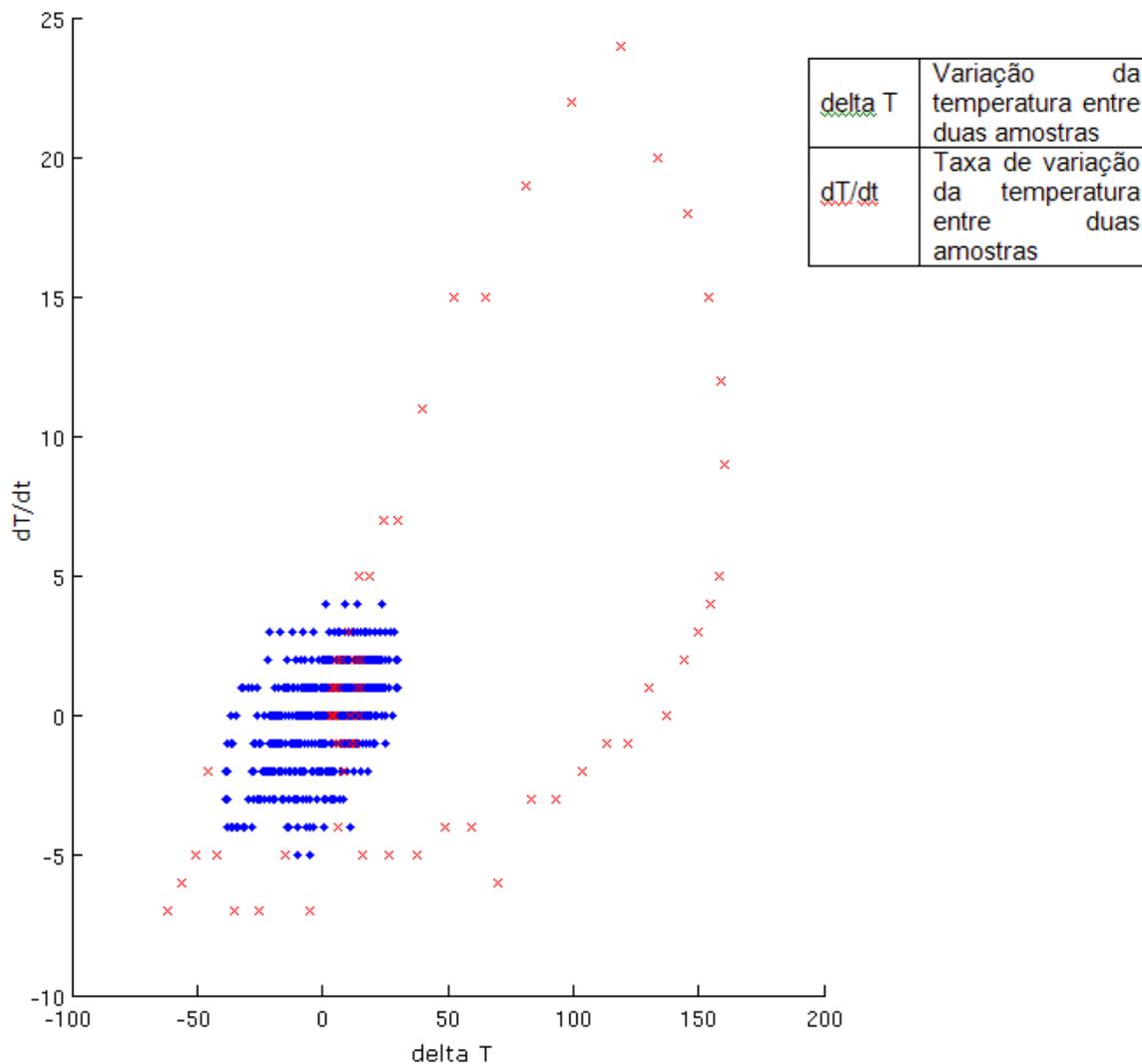


Figura 1. Análise de componentes principais para um lingotamento no qual ocorreu o *breakout*.

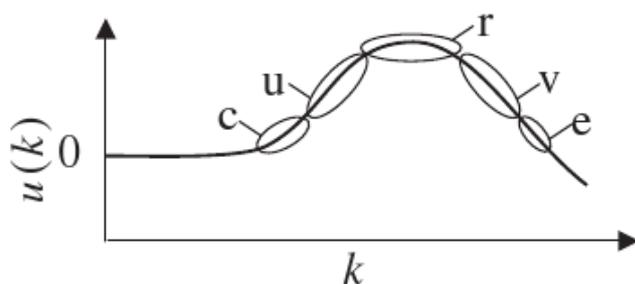


Figura 2. Associação entre as regiões da curva característica do *breakout* e os seus respectivos símbolos.⁽³⁾

Cada uma dessas regiões apresenta características próprias em relação aos componentes principais e à perturbação, sendo possível assim determinar em qual delas se encontra um conjunto de dados anômalos.

Para caracterizar um *breakout*, conjuntos de dados anômalos apresentados em sequência ao BDS devem passar por todas as regiões da curva, podendo permanecer por mais de um período de amostragem em uma mesma região e caminhar por regiões vizinhas sem restrições, porém sem saltar regiões. Por exemplo: uma sequência de anomalias associada à sequência de símbolos “curve”,

ou “cccuurrrvve”, ou “cuurrrrvvrve” é classificada como um *breakout*. Mas uma que seja associada à sequência “crve” ou “cre” não será considerada um *breakout*. A lógica completa de identificação de comportamentos de *breakout* através de seqüências de símbolos é mostrada pelo autômato da Figura 3.

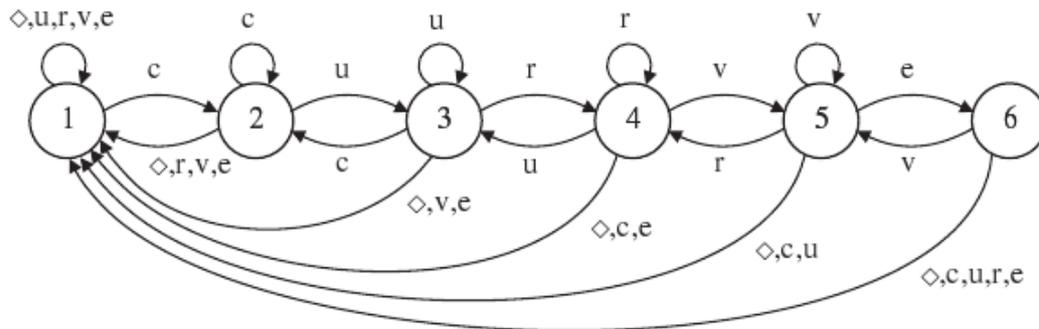


Figura 3. Autômato representativo da lógica de identificação de comportamentos de *breakout* através de seqüência de símbolos.⁽³⁾

Quando uma seqüência de anomalias é classificada como um comportamento característico de *breakout*, o BDS emite um alarme e toma as providências necessárias para evitar o *breakout*.

O modelo de comportamento normal é atualizado da seguinte forma: se um novo conjunto de dados é considerado como pertencente ao comportamento normal do sistema, a máquina de aprendizado incorpora esses dados atualizando o modelo. Caso o novo conjunto seja considerado como uma anomalia, a máquina de aprendizado envia os dados ao Detector de *Breakout* e aguarda o resultado de sua análise. Se o detector não classificar o conjunto como um comportamento de *breakout*, a máquina de aprendizado incorpora esses dados e atualiza o modelo. Por outro lado, se o conjunto for classificado como um comportamento de *breakout*, o alarme é disparado e a máquina de aprendizado monitora o fim do alarme para se reiniciar e aquirir uma nova janela inicial de comportamento considerado normal. O sistema proposto é apresentado na Figura 4 com os seus componentes funcionais e as suas interligações.

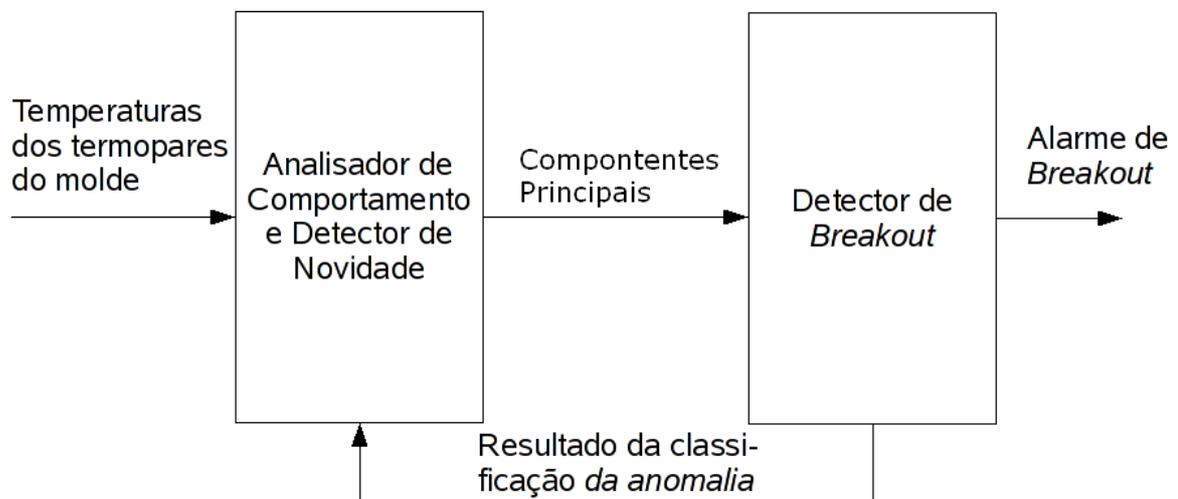


Figura 4. Diagrama resumido do BDS proposto.

3 RESULTADOS

O BDS proposto foi implementado no sistema de automação da aciaria da Usiminas paralelamente ao BDS existente e foi testado durante oito meses nas máquinas de lingotamento contínuo. Durante o período de testes, foi levantado o número de alarmes gerado pelo BDS proposto para averiguação se estes eram verdadeiros ou falsos. O mesmo levantamento foi feito para o BDS existente para comparação dos dois sistemas. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação do número de alarmes no período de teste

Classificação do alarme	BDS atual	BDS proposto
Verdadeiro	5	6
Falso 1	7	6
Falso 2	1	1
Total de alarmes Falsos	8	7
Total de alarmes	13	13

O alarme verdadeiro é aquele cuja placa apresentou marcas características de agarramento. O alarme falso 1 é considerado para placas que não apresentaram nenhuma marca. O alarme falso 2 refere-se a placas que apresentaram marcas, mas não por agarramento. Essas outras marcas podem ter sido causadas por falta de lubrificação ou pelo aparecimento de pequenas trincas. Essas situações podem causar variações na temperatura e são algumas vezes confundidas com agarramentos de pele.

Levantou-se também o horário de acionamento dos alarmes de cada sistema. Esse levantamento faz sentido para os alarmes verdadeiros que ocorreram simultaneamente nos dois sistemas para a mesma corrida, permitindo assim comparar a rapidez na detecção de *breakout*. Os resultados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Comparação do horário de acionamento do alarme

Nº corrida	Horário do alarme		Ganho de tempo
	BDS atual	BDS proposto	
1	04:44:47	04:44:40	7 s
2	05:45:45	05:45:27	18 s
3	07:33:50	07:33:35	15 s
4	07:03:36	07:03:00	36 s
5	02:36:10	02:36:01	9 s
Ganho médio de tempo no BDS proposto			17 s

Além desse período de testes, o BDS proposto foi avaliado com os dados históricos de corridas nas quais ocorreram *breakouts*. No total, foram oito corridas testadas e os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação do horário de acionamento do alarme nas corridas em que houve *breakout*.

Nº corrida	Horário do alarme		Ganho de tempo
	BDS atual	BDS proposto	
A	Não alarmou	07:52:51	-
B	Não alarmou	01:08:19	-
C	08:55:18	08:54:29	49 s
D	15:53:13	15:52:46	27 s
E	01:30:52	01:30:26	26 s
F	Não alarmou	13:12:41	-
G	Não alarmou	15:59:26	-
H	Não alarmou	08:52:34	-
Ganho médio de tempo no BDS proposto			34 s

Para determinar se um *breakout* será evitado, a Usiminas adota a medida da posição do ponto quente do agarramento em relação à base do molde. Se esta for menor ou igual a 420 mm e se tomadas as medidas adequadas, o *breakout* é evitado. Esse valor, denominado deslocamento, é determinado a partir do tempo mínimo necessário para que a região do agarramento de pele seja resfriada de forma a se evitar o *breakout*. O deslocamento pode ser calculado subtraindo-se o horário de acionamento do alarme, do horário de aparecimento do ponto quente no molde (ponto onde se iniciou o agarramento de pele) e multiplicando-se essa diferença pela velocidade de lingotamento como mostrado pela equação 1.

$$\text{deslocamento} = (t_{\text{alarme}} - t_{\text{pontoquente}}) v_{\text{lingotamento}} \quad (1)$$

A partir da equação 1, calculou-se pelo BDS proposto o deslocamento para as corridas em que houve *breakout*. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Deslocamento no BDS proposto para as corridas em que houve *breakout*

Nº corrida	Deslocamento (mm)
A	320,83
B	319,17
C	356,67
D	424,67
E	377,83
F	390,67
G	363,67
H	336,67
Deslocamento médio	361,27

O BDS proposto também foi comparado com um BDS comercial, já implantado em algumas usinas da comunidade econômica européia, utilizando dados históricos de três corridas nas quais ocorreram *breakout*. O critério avaliado foi o horário de acionamento do alarme. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Comparativo entre o BDS comercial e o BDS proposto.

Nº corrida	Horário do alarme		Ganho de tempo
	BDS comercial	BDS proposto	
D	15:52:47	15:52:46	1 s
G	15:59:34	15:59:26	8 s
H	08:52:24	08:52:34	-10 s

4 DISCUSSÃO

Pelos resultados apresentados, verifica-se que o BDS proposto é superior ao BDS atual em vários aspectos.

A primeira comparação entre os dois sistemas é com relação ao número de alarmes. Observando a Tabela 1, o BDS proposto foi capaz de detectar um agarramento de pele a mais que o atual. Isso é um sinal que o BDS atual não está detectando certos agarramentos que poderiam gerar um *breakout*. Além disso, o BDS proposto gerou um alarme falso a menos, ou seja, ele pararia menos a produção desnecessariamente. Essa diferença entre o número de alarmes, evidencia que os dois sistemas são equivalentes nesse requisito, ainda com vantagem para o sistema proposto. Assim, a substituição do sistema atual pelo proposto não traria nenhum prejuízo em relação ao número total de alarmes gerados. Deve-se levar em conta que os dados históricos das corridas em que houve *breakout* não entraram nesse levantamento.

O segundo critério confrontado foi o horário de acionamento do alarme nos dois sistemas. Verificou-se que o BDS proposto sempre acionou o alarme antes do BDS atual. Para as cinco corridas analisadas e apresentadas na Tabela 2, o ganho médio de tempo foi de 17 segundos. Essa é uma grande vantagem apresentada pelo BDS proposto em relação ao atual, pois o quanto antes se detectar o agarramento de pele, mais tempo haverá para que se possam tomar as providências necessárias para se evitar o *breakout*.

Analisando os resultados para os testes realizados com os dados históricos de corridas onde ocorreu o *breakout*, novamente observa-se a vantagem do BDS proposto. Ele foi capaz de detectar todos os *breakouts*, enquanto o BDS atual detectou somente três e não foi capaz de evitá-los, pois eles foram detectados tardiamente. Nas corridas em que os dois sistemas acionaram o alarme, mais uma vez o BDS proposto teve o seu alarme acionado antes do atual com um ganho médio de 34 segundos. Esse ganho é maior do que a observada para os alarmes das corridas nas quais se conseguiu evitar o *breakout*, onde o ganho médio foi de 17 segundos.

Somente detectar o agarramento de pele não é suficiente, é necessário detectá-lo a tempo de evitar o *breakout*. Para isso, a Usiminas criou a medida chamada deslocamento. Pode-se verificar, pelos resultados obtidos de deslocamento, que o sistema proposto conseguiria evitar todos *breakouts* das corridas analisadas, pois todas apresentaram valores de deslocamento abaixo ou muito próximos a 420 mm, valor definido como o limiar para que se pudessem tomar as providências necessárias a tempo de evitar o *breakout*. O deslocamento médio obtido pelo sistema proposto para as corridas analisadas foi de 361,27 mm, ou seja, 58,73 mm abaixo do limiar.

A última comparação realizada foi entre o BDS proposto e um BDS comercial. O requisito comparado foi o horário de acionamento do alarme para corridas onde ocorreu o *breakout*. Verificou-se que o BDS proposto acionou o alarme antes, em duas das três corridas analisadas. Para as corridas analisadas pode-se concluir que os dois sistemas se equiparam quanto a esse requisito, pois em uma corrida a diferença entre os horários de alarmes foi muito pequena (1 s) e para as outras duas a diferença foi muito próxima (10 s de antecedência para o BDS comercial em uma e 8 s para o BDS proposto em outra).

Outra consideração que merece destaque é o fato do novo sistema ter sido desenvolvido sem a necessidade de investimentos para adequação ou

remodelagem da planta. Foram utilizados apenas os registros de dados históricos de operação.

5 CONCLUSÃO

Em vista dos resultados obtidos, estima-se que o BDS proposto possa substituir com vantagens o BDS atual da Usiminas. Ele apresenta praticamente o mesmo número de alarmes falsos, consegue detectar agarramentos de pele com mais antecedência que o BDS atual e detecta agarramentos que o sistema atual não consegue detectar. Além disso, ele equiparou-se, em tempo de detecção, ao BDS comercial avaliado, detectando os *breakouts* que ocorreram na Usiminas nos últimos anos, tendo-os evitado.

A abordagem proposta para o BDS, de detecção através de máquina de aprendizado e classificação de anomalias pela associação a símbolos, mostrou-se uma maneira viável e eficiente para detectar e evitar *breakouts*, salientando ainda que foi desenvolvida sem a necessidade de investimentos na planta.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos engenheiros Hiroshi Jorge Takahashi e Cristiano de Lanna pelo apoio e ajuda fornecida ao longo do desenvolvimento desse trabalho. Também agradecem à Usiminas pelo financiamento do trabalho e à Escola de Engenharia da UFMG, por meio da Fundação Christiano Ottoni, pelo auxílio técnico.

REFERÊNCIAS

- 1 BHATTACHARYA , A. K.; CHITHRA, K.; JATLA, S.; SRINIVAS P. Fuzzy diagnostics system for breakout prevention in continuous casting of steel. In: Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, 2004. **Proceedings...** P. R. China: IEEE Press, 2004, v. 4, p. 3141-3145.
- 2 LEMOS , A. P. **Proposta de um algoritmo genérico de detecção de novidades em séries temporais utilizando modelos de previsão.** 91 p. (Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação em engenharia elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- 3 KEMPF, R.; ADAMY, J. Sequential pattern recognition employing recurrent fuzzy system. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 146, n. 3, p.451-472, September 2004.