

# REDUÇÃO DO NÚMERO DE RUPTURAS NO LAMINADOR DE TIRAS A FRIO DA ARCELORMITTAL VEGA ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA LEAN SIX-SIGMAS<sup>1</sup>

Danilo Gonçalves de Oliveira<sup>2</sup>

Thiago Alves König<sup>3</sup>

Charles Pierrri de Souza<sup>4</sup>

Rogério Martins Pereira<sup>5</sup>

Sérgio dos Santos Rocha<sup>6</sup>

## Resumo

As recentes demandas por aumento de produção linha de Decapagem e Laminador de Tiras a Frio da ArcelorMittal Vega levaram à análise profunda das principais causas de parada da linha visando o aumento da disponibilidade e atendimento da demanda. Essa análise mostrou necessidade de atuação no sentido de reduzir o número de rupturas de tira durante o processo no Laminador de Tiras a Frio. Para tanto foi aplicada a Metodologia Lean Six-Sigmas e, através do uso de ferramentas estatísticas por um grupo dedicado e poucos recursos financeiros, os resultados obtidos estão de acordo com as expectativas de redução significativa no número de eventos causados por influência do Laminador.

**Palavras-chave:** Laminador de tiras a frio; Ruptura; 6 Sigmas; Transição; Parada; Partida.

## REDUCING THE NUMBER OF STRIP BREAKS AT THE TANDEM COLD MILL OF ARCELORMITTAL VEGA USING LEAN SIX-SIGMA METHODOLOGY

### Abstract

The recent demands for a production increase at the Pickling and Tandem Cold Mill line at ArcelorMittal Vega has lead to a deep analysis of the major causes of line stop aiming the improvement of the line availability ratio and thus attending the market demands. Such evaluation demonstrated the need to reduce the number of strip breaks during the cold rolling process. To achieve this the Lean Six-Sigma Methodology have been applied and, through statistic modeling and dedication of a specific team, the results achieved are according to the expectations and a significant reduction of strip breaks influenced by the cold mill are being recorded.

**Key words:** Cold rolling mill; Strip breaks; 6 Sigmas; Transition; Mill stop; Mill start.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Eletricista, Especialista de Processo de Produção, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

<sup>3</sup> Tecnólogo em Gestão da Produção, Especialista de Processo de Produção, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

<sup>4</sup> Tecnólogo em Processos Industriais, Analista de Produção, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

<sup>5</sup> Físico, Especialista de Manutenção, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

<sup>6</sup> Eng. Metalúrgico, Gerente de Confiabilidade IVL, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

## 1 CONTEXTO

O atual momento da indústria siderúrgica mundial pressiona cada vez mais as empresas do setor na direção da redução dos custos de produção e aumento de produtividade com o mínimo de investimento.

O Laminador de Tiras a Frio da ArcelorMittal Vega está operando em capacidade plena desde meados de 2012.

Sendo uma linha contínua acoplada com a Decapagem e munida de duas enroladeiras implica em perda de produtividade sempre que um evento de interrupção de uma das linhas com duração superior a 3 minutos é registrado.

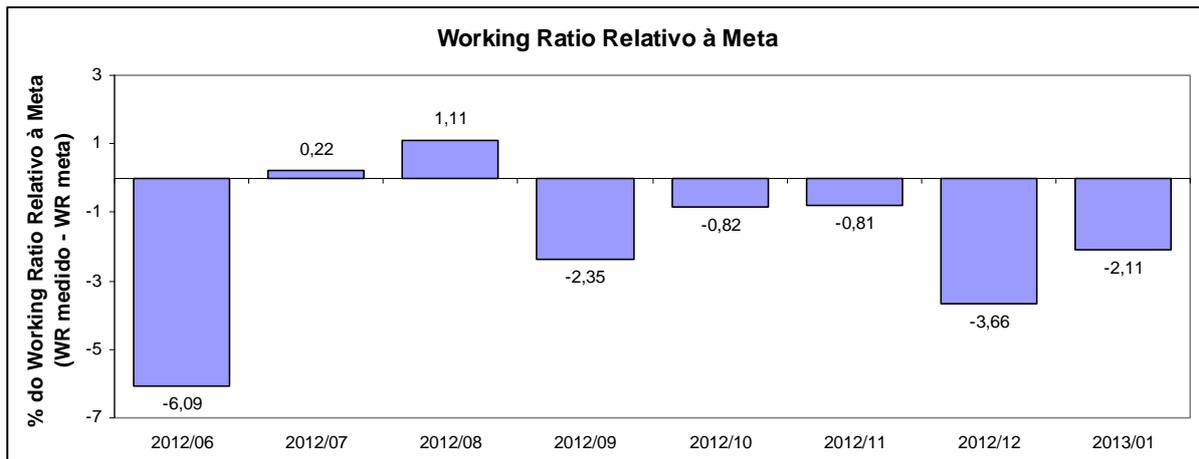


Figura 1. Indicador de Taxa de Trabalho relativo à meta (WR medido – WR meta).

Para garantir a consecução dos planos de produção, um dos principais indicadores disponíveis é o Indicador de Taxa de Trabalho (*working ratio*), que é a relação entre o tempo não planejado de linha parada e tempo disponível para produção. Ao longo do ano de 2012 esse indicador esteve em torno de 3% abaixo da meta, resultando em atrasos na produção de bobinas laminadas a frio, o que impacta diretamente na produção das linhas subsequentes.

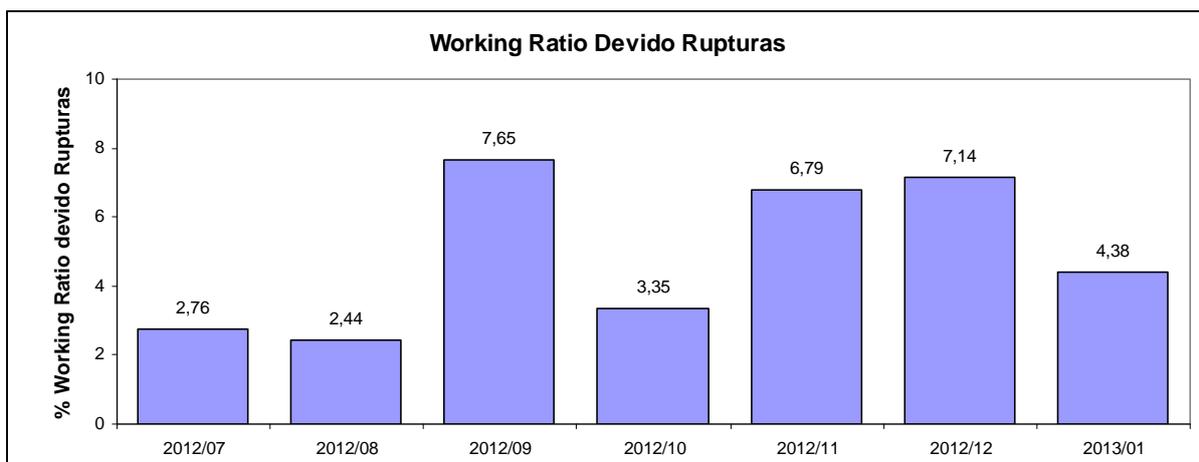


Figura 2. Contribuição das Rupturas na redução do Indicador de Disponibilidade.

Diante desse cenário, foi definida uma equipe de especialistas para tratar as principais causas de interrupção do processo de Laminação a Frio através da aplicação da Metodologia Lean Six-Sigmas.<sup>(1)</sup>

Através da análise das principais causas de interrupção do processo de Laminação a Frio na ArcelorMittal Vega, foi identificado que as rupturas de tira eram a segunda principal causa de parada resultando em perda de produtividade significativa. No mês de Dezembro de 2012, por exemplo, o processo produtivo ficou interrompido 7,14% do tempo disponível devido ocorrências de rupturas e suas consequências como trocas de cilindros ou quebras de equipamentos.

Além da interrupção do processo de Laminação a Frio, as rupturas eram ainda a principal causa de consumo de cilindros resultando em aumento dos custos de produção, além dos impactos no desgaste dos componentes mecânicos, que são mais dificilmente quantificados.

O evento de ruptura de tira constitui de uma deformação acima do limite de resistência do material em um determinado ponto do processo de Laminação a Frio e essa deformação se distribui ao longo da largura do material causando a interrupção do processo, segundo Umlauf e Rymsza.<sup>(2)</sup>

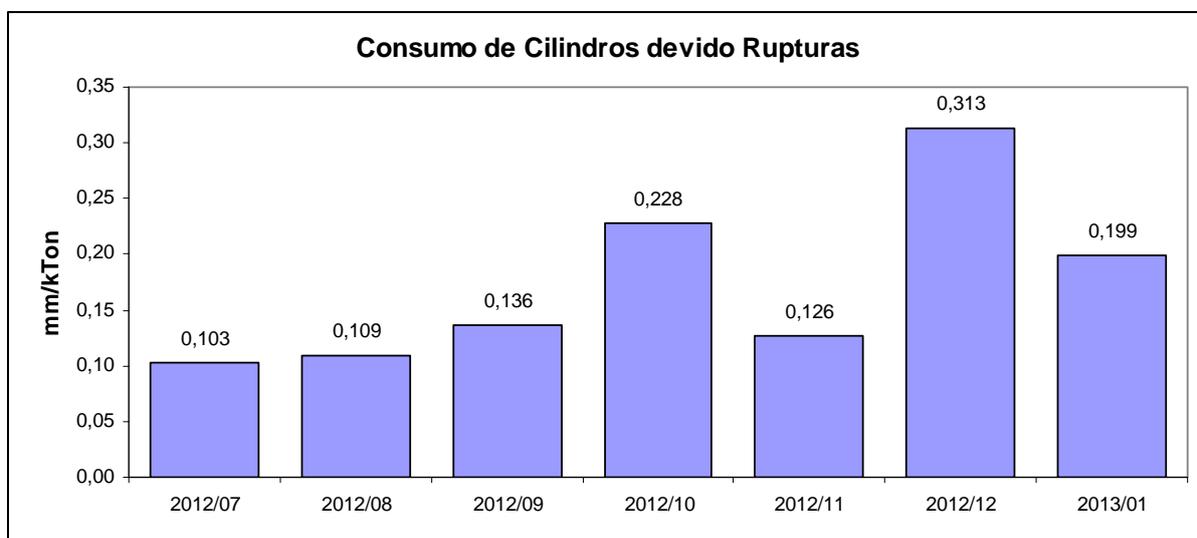


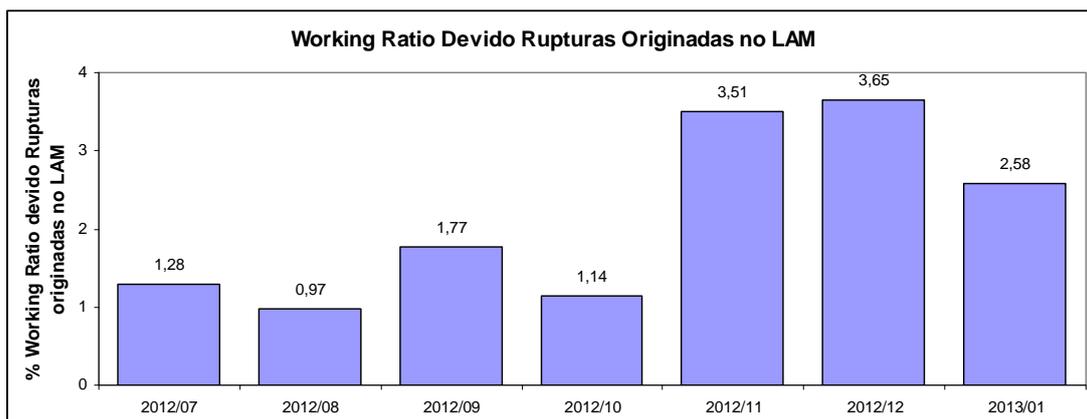
Figura 3. Consumo de cilindros de trabalho devido Rupturas (mm/kTon).

## 2 DESENVOLVIMENTO

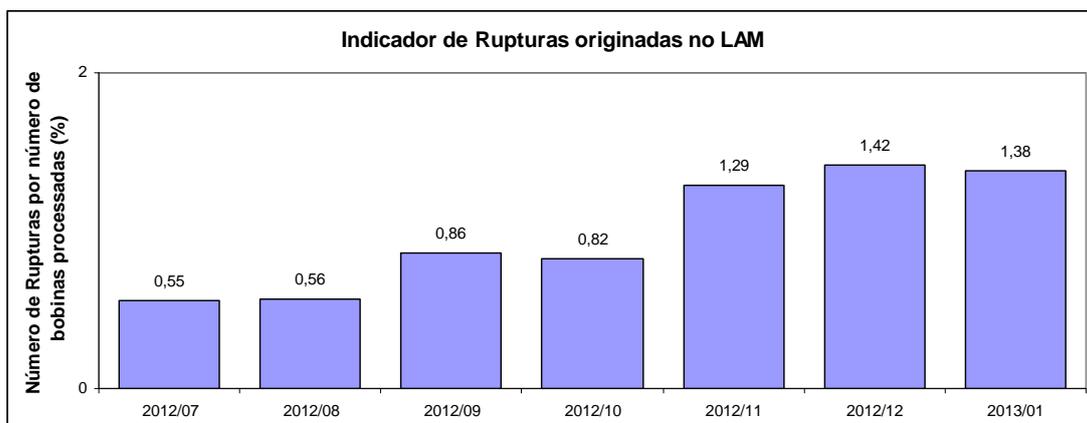
O evento ruptura de tira no Laminador de Tiras a Frio (LAM) é classificado em três grupos relacionados com a origem do defeito:

- eventos originados no LAM;
- rupturas causadas por problemas de qualidade do processo de solda a laser;
- rupturas causadas por defeitos gerados antes do processo de decapagem.

Este trabalho teve seu escopo restringido para tratar apenas as rupturas com origem no LAM, uma vez que foi definida equipe específica para tratar as demais causas de rupturas. Pela avaliação das causas dos eventos foco deste trabalho, foi observado que o trabalho seria direcionado para tratativa das rupturas de partida e de transição. Além disso, foi definida nova metodologia de classificação das rupturas para reduzir o número de eventos apontados com o motivo indefinido.

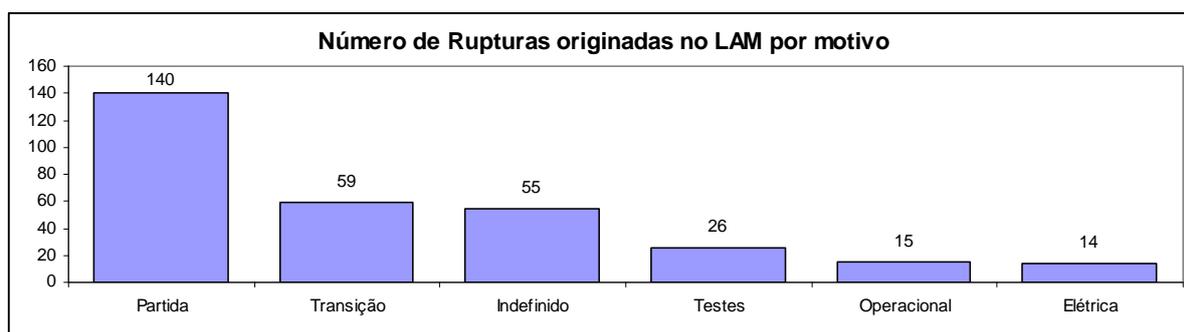


**Figura 4.** Percentual do Indicador de Taxa de Trabalho devido rupturas originadas no LAM.



**Figura 5.** Indicador de Rupturas originadas no LAM (número de rupturas no LAM por número de bobinas processadas).

Uma elevação significativa no Indicador de Rupturas é observada a partir do mês de Novembro de 2012. Neste mês especificamente foram realizados testes para a homologação de novos materiais no LAM, resultando numa elevação dos Indicadores, mas de forma pontual.



**Figura 6.** Rupturas no LAM separadas por motivo de Jun/12 a Jan/13.

Já em Dezembro de 2012 foi realizada a troca dos engrenamentos da caixa redutora da Cadeira 1, o que influenciou diretamente na ocorrência das rupturas de partida. Em Janeiro de 2013 uma nova metodologia de classificação dos eventos foi implantada, o que levou a indicar rupturas anteriormente classificadas como solda de má qualidade para originadas no LAM, também contribuindo para a alteração no comportamento do indicador.

### 3 ANÁLISE DOS EVENTOS E AÇÕES PARA TRATATIVA

A identificação do modo de falha que deu origem ao evento ruptura de tira influenciada pelo Laminador de Tiras a Frio permitiu analisar separadamente cada uma no sentido de identificar a causa raiz.

#### 3.1 Rupturas de Partida

##### 3.1.1 Análise do evento

São classificados como rupturas de partida todos os eventos que ocorreram durante não apenas a sequência de partida, mas englobam ainda a sequência de parada do Laminador de Tiras a Frio. O que motivou a parada da linha não é o foco das análises, uma vez que esse pode ser um *set-up* na linha de Decapagem, como exemplo. A investigação é direcionada para o que levou o LAM a não ser capaz de realizar a sequência de parada e partida sem gerar a ruptura.

Através da aplicação da Metodologia Lean Six-Sigmas foi identificado uma discrepância significativa no modo operacional empregado durante o tempo em que o LAM estava parado. Foi observado que algumas equipes de Operação aguardavam a abertura automática das cadeiras, realizada 90 segundos após a parada da linha. Ao contrário, outras equipes realizavam manualmente o procedimento de abertura das cadeiras logo após atingir a velocidade de zero metros por minuto (mpm).

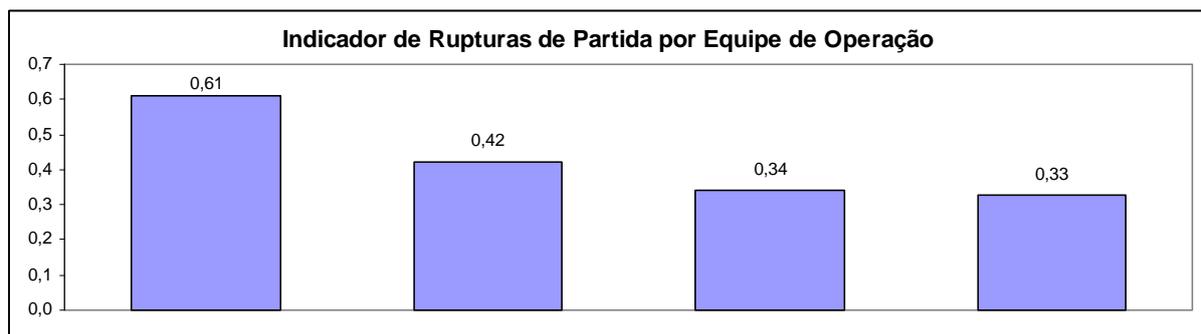
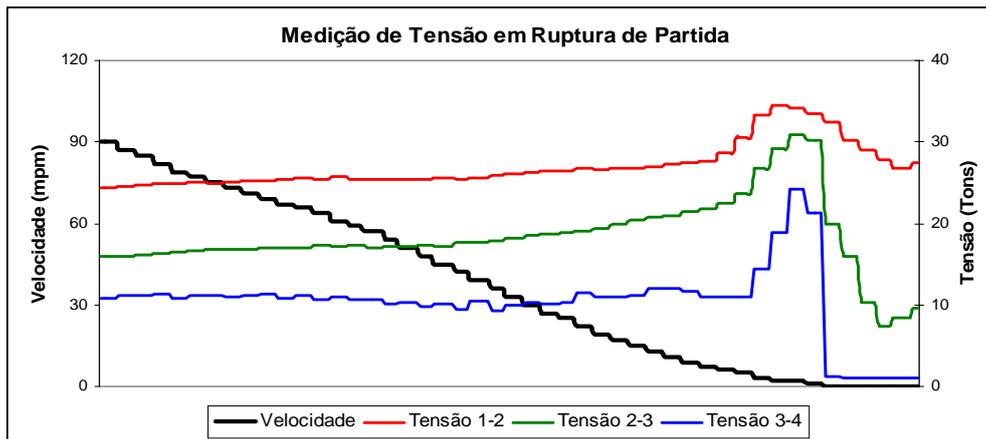


Figura 7. Rupturas no LAM separadas por motivo de Jun/12 a Jan/13.

Em análise das diferenças encontradas no procedimento, foi investigada a relação entre o tempo de aplicação de força e a ocorrência de rupturas e constatado que quanto maior o tempo de força de laminação aplicada sobre a tira, maior é o risco de ocorrência de ruptura de partida. Essa relação se baseia nas medições de espessura realizadas pelo equipamento posicionado após a Cadeira 1, que identificava uma queda acentuada na espessura da tira localizada na região que foi submetida à força de laminação por longos períodos. A mesma causa pode ser atribuída a uma leve queda de tensão medida quando a região sob a Cadeira 2 era laminada na Cadeira 3. Essa região com baixa espessura, quando submetida aos transitórios de partida, estava mais propensa a permitir o início da ruptura.

Além da aplicação de força com a linha parada por tempo elevado, foi constatada ainda uma elevação de tensão significativa durante a sequência de parada. Essa elevação de tensão se mantinha durante o tempo em que as forças de laminação fossem aplicadas ao material. Durante a sequência de partida, havia um aumento ainda mais significativo das tensões resultando na ruptura de partida.



**Figura 8.** Medição de tensão entre vãos em evento de Ruptura de Partida.

Para identificação das causas dessas variações de tensão foi necessária uma análise detalhada dos parâmetros definidos no acionamento dos motores das cadeiras de laminação e sua forma de controle de velocidade e corrente durante as sequências de parada e partida.

O Laminador de Tiras a Frio trabalha quase que a totalidade do tempo no modo de controle de velocidade. Porém, durante a sequência de parada e partida da linha, existe uma comutação do modo de controle de velocidade para o modo de controle de corrente, uma vez que o controle de velocidade não pode trabalhar com velocidades angulares visadas próximas de zero RPM.

Essa alteração de modo de controle dos motores é definida para ocorrer em cada acionamento de acordo com a velocidade angular medida nos motores. Como existe diferença de velocidade linear entre cadeiras em razão da redução de espessura ao longo do processo, a mesma velocidade angular nos motores ocorria em velocidade linear em mpm em momentos diferentes. O resultado é uma cadeira fazendo a mudança do modo de controle antes das demais levando a diferenças de velocidade no material laminado. Além disso, em Dezembro de 2012 houve a substituição dos engrenamentos internos da Redutora da Cadeira 1, o que aumentou ainda mais a influência desse efeito nas tensões entre cadeiras.

Após a comutação para o controle de corrente e o alcance da velocidade de zero RPM, a corrente nos motores continuava sendo controlada pelo acionamento em um determinado valor fixo para manter o material tensionado e permitir a partida com menores perturbações. Entretanto a corrente definida como referência no acionamento dos motores não depende das características metalúrgicas do material, fazendo que com que em bobinas de baixa espessura e limite de resistência o nível de corrente definido fosse capaz de manter a tensão muito acima do especificado para o material.

Essas duas particularidades do sistema de controle, adicionadas ao elevado tempo de exposição do material a estes esforços e das baixas espessuras em questão, foram identificadas como as principais causas para ocorrências das rupturas de partida.

### **3.1.2 Ações para tratativa das rupturas de partida**

Diante dessa constatação, o primeiro passo foi a definição de um procedimento operacional solicitando a abertura imediata das cadeiras sempre que o Técnico de Operação tiver ciência de que o tempo de parada será superior aos 90 segundos da aplicação em automático.

Em seguida foram realizadas experiências na tentativa de se encontrar o melhor nível de corrente aplicada aos motores para manter o sistema estável e alterar a velocidade em RPM de comutação no intuito de fazer com que as 4 cadeiras mudassem para o modo de corrente ao mesmo tempo.

As experiências demonstraram que o ideal para a redução dos eventos observados no Laminador de Tiras a Frio da ArcelorMittal Vega era a extinção da aplicação de corrente a velocidade de zero RPM, fazendo com que os motores ficassem com corrente igual a zero logo após a parada.

Apesar dessa prática não eliminar a elevação de tensão durante a parada, os efeitos danosos de queda na espessura foram amenizados significativamente, resultando em redução acentuada dos índices de ruptura de partida.

## 3.2 Rupturas de Transição

### 3.2.1 Análise do evento

Em benchmarks realizados com as demais plantas do Grupo ArcelorMittal e contato com o Centro de Pesquisa em Chicago, EUA, foi identificada discrepância entre a forma de classificação de rupturas aplicada na ArcelorMittal Vega e o praticado nas demais unidades.

Alguns eventos de ruptura inicialmente classificados como causados pela qualidade da solda a laser ocorriam por haver uma contribuição significativa do processo de laminação a frio. Esses estavam relacionados especificamente com a transição de materiais de elevado limite de resistência para materiais de mais baixa resistência.

Durante o processo dos materiais de elevada resistência mecânica é necessária a aplicação de forças de laminação relativamente altas para atingir a espessura de saída especificada. Durante a passagem da solda pelo LAM, as forças de laminação aplicadas ao material de elevada resistência mecânica são aplicadas momentaneamente ao material de baixa resistência. Segundo Brannbacka e Rymsza,<sup>(3)</sup> o efeito imediato é uma redução significativa na espessura na saída de cada cadeira no material de baixo limite de escoamento. Quando essa oscilação na espessura atinge a cadeira seguinte, uma queda de tensão abrupta pode ser medida. Esse efeito ocorre em todas as cadeiras e seus efeitos são agravados em cada uma à medida que o material é laminado e normalmente culmina com a ruptura de transição na saída da Cadeira 3.

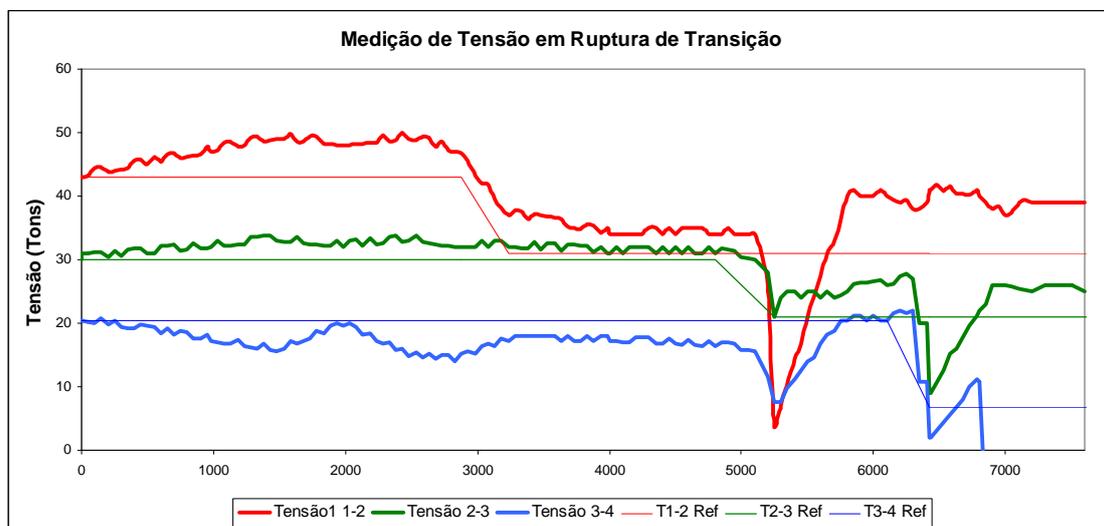
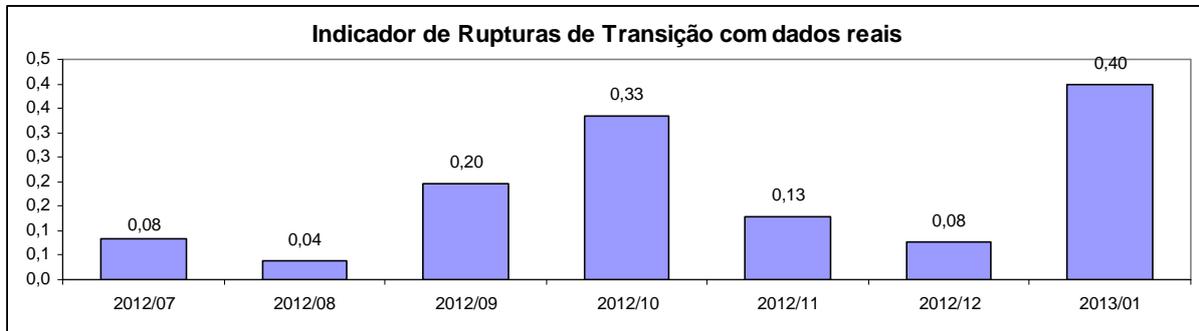


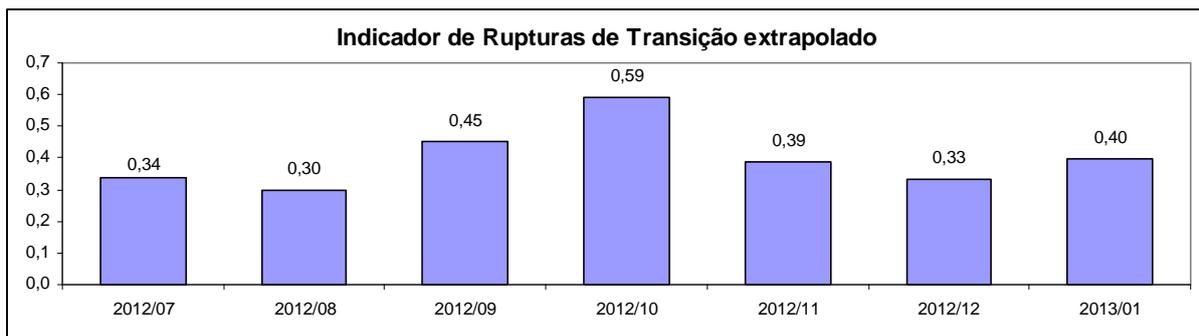
Figura 9. Medição de tensão entre vãos em evento de ruptura de transição.

Foi necessária uma quebra de paradigma de 9 anos na análise das rupturas para que uma nova metodologia de classificação de rupturas fosse colocada em prática a partir do mês de Janeiro de 2013. Essa é a principal explicação para a elevação significativa do Índice de Rupturas no período.



**Figura 10.** Indicador de Rupturas de Transição.

Uma extrapolação simples considerando a elevação do Índice de Rupturas após a reclassificação para o ano de 2012 dá uma dimensão mais correta da real contribuição deste fenômeno ao longo do tempo e mais coerente com o mix de material produzido no período.



**Figura 11.** Indicador de Rupturas de Transição extrapolado para o período anterior à reclassificação.

Apesar de serem mais sintomáticas quando o evento é registrado na saída da Cadeira 3, as rupturas de transição também foram registradas com certa regularidade na saída da Cadeira 1. Nesta situação, a transição de resistências mecânicas dos materiais soldados é ainda mais severa. Os efeitos das rupturas de transição na Cadeira 1 são ainda mais danosos para a parte mecânica do equipamento, resultando em um determinado evento na quebra da transmissão da Cadeira 1.

Adicionalmente à transição de resistência mecânica entre dois materiais soldados, foi observado que as soldas com elevações de espessura apresentam o mesmo comportamento, conforme Brannbacka. Já Umlauf pontua que a diminuição de largura resultante da utilização de entalhes na tira no processo de Aparamento de Bordas para realização de *set-ups* contribui para a variação de tensão durante o processamento da solda no LAM.

### 3.2.2 Ações para tratativa das rupturas de transição

As referências para o processo de passagem de soldas no LAM são determinadas pelo Modelo Matemático TCM3000, que é um *software* de propriedade da atual GE Converteam: o Modelo recebe as informações do sistema de controle do LAM

quanto ao próximo material a ser processado, calcula os *set-points* para a próxima bobina e as referências a serem aplicadas durante a transição entre os *set-points* atuais e os próximos.

Esse cálculo é realizado através de um algoritmo iterativo que determina a redução em cada bobina que acarretará a menor perturbação na velocidade das cadeiras durante a transição dos materiais. Com a identificação dessa redução, as forças de laminação, posicionamento dos cilindros hidráulicos e velocidade dos motores são determinados.

Entretanto essa estratégia não leva em consideração as perturbações causadas na tensão entre vãos ou na espessura do material laminado, que são a causa fundamental das rupturas de transição.

Através da análise das ocorrências de rupturas de transição, a equipe definida para análise do problema foi capaz de determinar um novo modelo de transição de soldas para aquelas em que há a redução da resistência mecânica do material. Esse modelo leva em consideração as forças de laminação aplicadas e as referências para o próximo material para determinar a compensação necessária para evitar a queda de espessura na região da solda no material com menor limite de escoamento.

Os testes em linha com o novo modelo de transição de soldas mostraram resultados expressivos, reduzindo consideravelmente a queda de espessura e variações de tensão observadas durante o processamento da solda. Como consequência, os números de rupturas de transição apresentaram queda acentuada desde o fim do comissionamento do modelo.

A segunda ação foi adequar os padrões de programação de materiais de elevada resistência, alterando a prioridade durante o sequenciamento das bobinas de forma que o término do processamento desses materiais seja seguido de bobinas com propriedades mecânicas intermediárias antes de processar materiais com baixo limite de resistência.

## 4 RESULTADOS

A aplicação da Metodologia Lean Six-Sigmas permitiu investigar criteriosamente as causas de rupturas de tiras no Laminador de Tiras a Frio da ArcelorMittal Vega.

O plano de ações traçado a partir das investigações foi consistente, resultando em diminuição sistemática dos índices de ruptura originadas no LAM mês a mês.

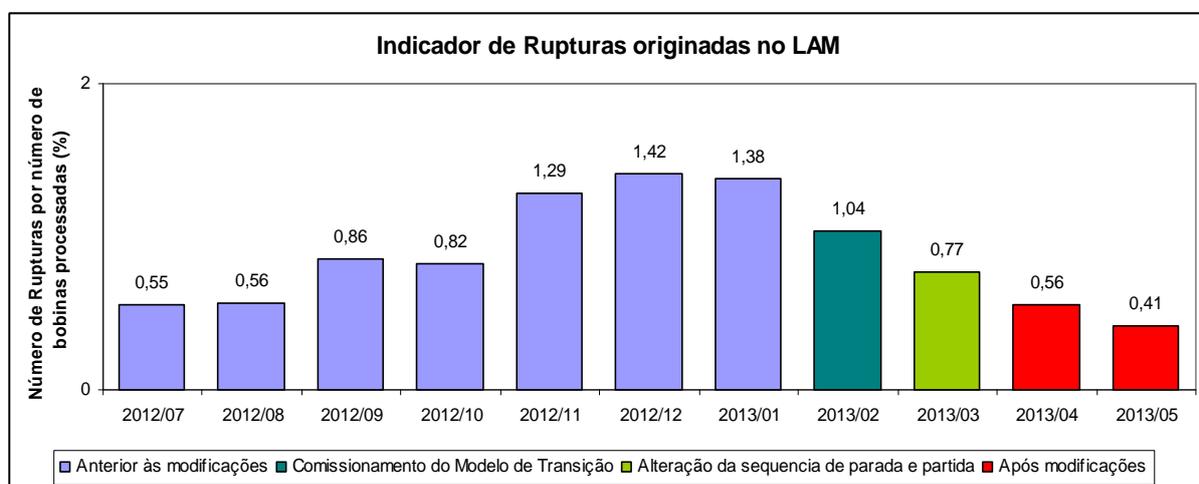


Figura 12. Indicador de Rupturas originadas no LAM.

Apesar dos resultados já alcançados serem expressivos, o nível 6 Sigmas ainda não foi alcançado. A complexidade do processo de laminação a frio e as diversas variáveis envolvidas tornam esta uma missão desafiadora. Entretanto já foram mapeadas ações para dar prosseguimento ao processo de melhoria contínua.

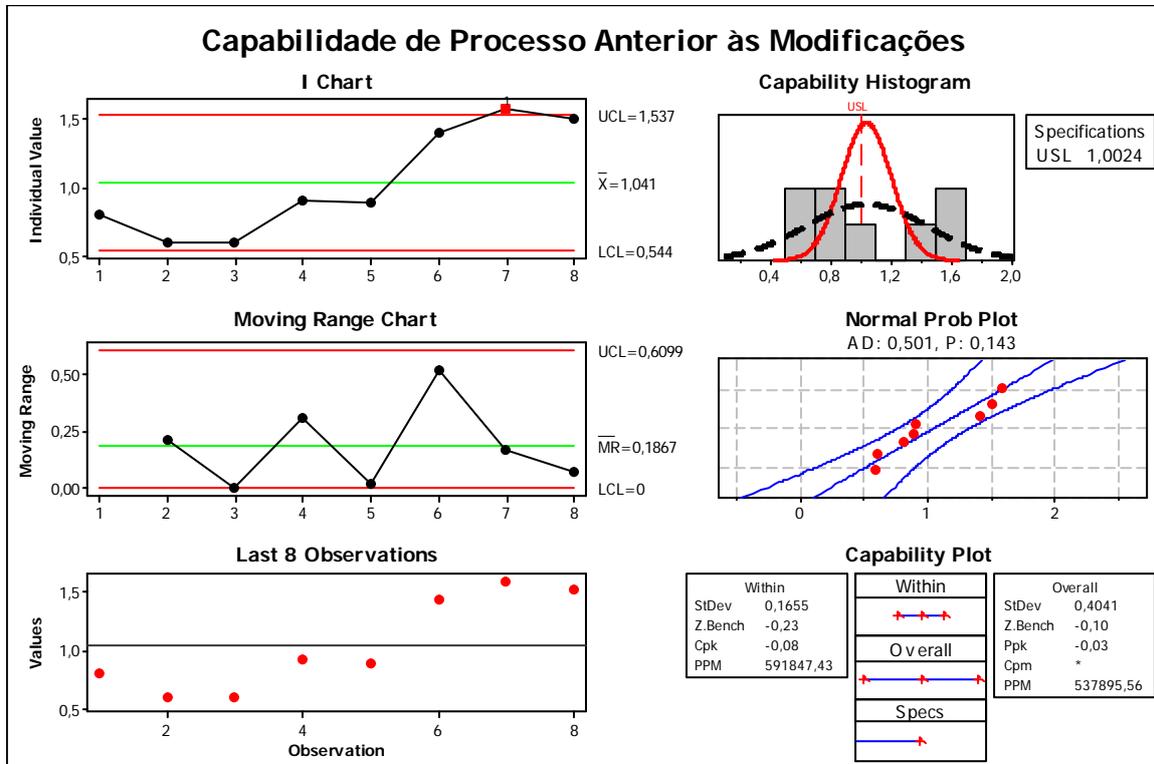


Figura 13. Capacidade do processo antes das modificações.

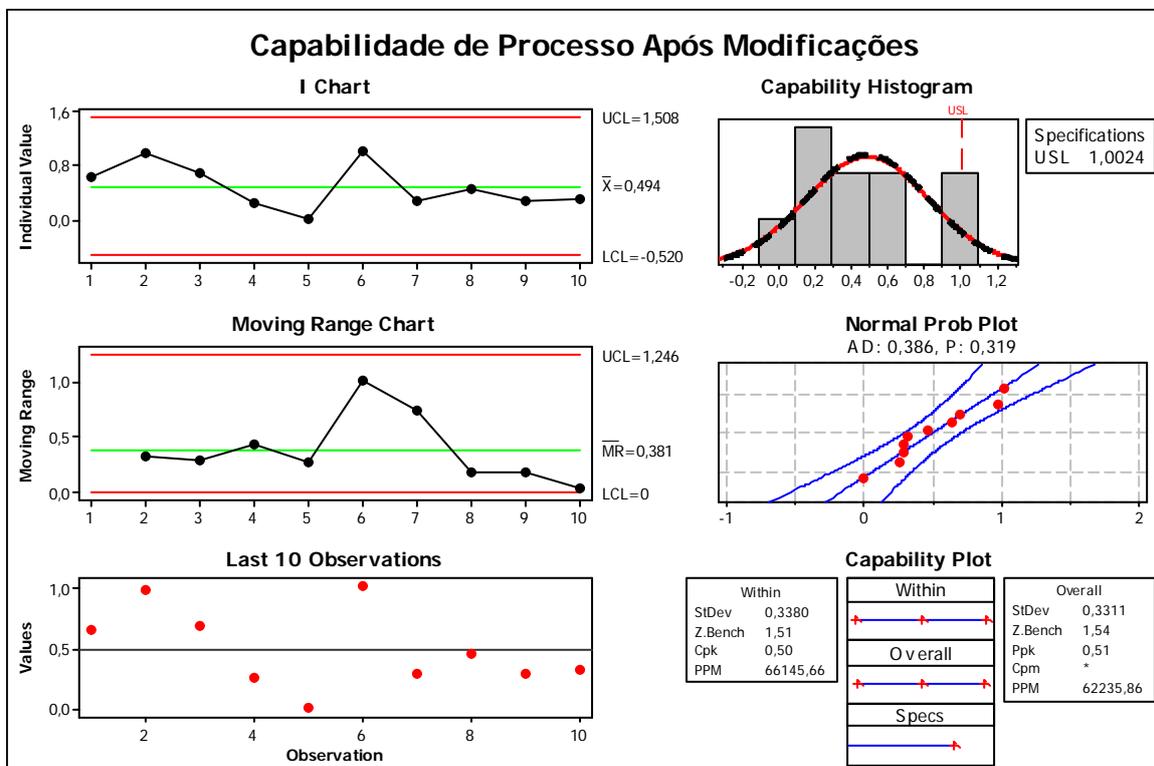


Figura 14. Capacidade do processo após as modificações.

## REFERENCIAS

- 1 ROTONDARO, Roberto G. "Seis Sigma - Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços". São Paulo: Atlas, 1ª Edição 2002
- 2 W. P. Umlauf, G. A. Rymza. "Use of digital simulation to design and develop width notch compensation to eliminate weld breaks for a continuous cold mill", Proc. METEC, Dusseldorf, 2007, pp 144-151
- 3 J. Brannbacka, G. Rymza, D. Bell, "Development and implementation of novel transition model for a continuous cold mill", Proc METEC, Dusseldorf, 2011.