

REDUÇÃO DOS DESVIOS POR BAIXA TEMPERATURA DE ACABAMENTO EM UM PROCESSO DE LAMINAÇÃO A QUENTE¹

Danilo Guelli Gonçalves de Oliveira²
Júlio Henrique Pimentel Medrano²
Fernando Antonio Elias Claro³

Resumo

O objetivo do presente estudo foi reduzir os desvios por baixa temperatura de acabamento no processo de laminação a quente de tiras de aço, usadas em geral como matéria-prima para fabricação de embalagens de folha metálica para produtos alimentícios. Se por um lado o controle deste parâmetro de processo é complexo devido à baixa espessura do aço utilizado, por outro lado sua manutenção em níveis adequados é de crucial importância para garantir a estampabilidade do produto final. Neste estudo de caso buscou-se identificar as causas fundamentais do problema e estabelecer faixas de trabalho apropriadas para as variáveis chave do processo. Diversas ferramentas de melhoria da qualidade foram utilizadas, entre elas o diagrama de causa e efeito e o planejamento fatorial. Para monitorar este processo foi desenvolvido um gráfico de controle que leva em conta a não-estacionariedade da média e a dependência em série existente.

Palavras-chave: Controle do processo; Laminação; Planejamento fatorial; Qualidade.

LOW FINISHING DELIVERY TEMPERATURE-RELATED NON CONFORMITIES REDUCTION IN A HOT ROLLING PROCESS

Abstract

The purpose of the present study was to reduce the low temperature-related non conformities during the finishing stage in a hot rolling process of steel strips, primarily used as raw material for the tin plate cans manufacturing. If by one hand the control of this process parameter is complex due to the low steel thickness, by the other hand its maintenance in suitable levels is of crucial importance to assure the stampability of the final product. In this case study the problem root causes were identified and proper working ranges established for the process key variables. Several quality improvement tools were employed, such as the cause and effect analysis diagram and the factorial planning. To monitor the steel strip temperature a control chart was developed taking into account the non-stationarity of the process mean and the autocorrelation.

Keywords: Hot rolling; Factorial planning; Process control; Quality.

¹ Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Mestrando Engenharia de Produção Mecânica – Universidade de Taubaté.

³ Professor Mestrado Engenharia de Produção Mecânica – Universidade de Taubaté.

1 INTRODUÇÃO

Diante da crescente oferta de produtos siderúrgicos laminados a quente, seja devido ao eminente crescimento da produção nacional ou devido à possibilidade de importação, torna-se questão de sobrevivência a busca pela excelência operacional.

Com a finalidade de garantir a competitividade neste cenário, os desvios de qualidade que se apresentam na rotina em produtos laminados a quente são alvo de controle permanente e geralmente estão associados às causas aleatórias (inerentes ao processo), sendo, portanto, comumente tratados por meio de Método de Solução de Problema convencional. Ainda assim quando ocorrem não conformidades associadas às causas assinaláveis estas são facilmente identificadas e tratadas.

Neste cenário de aparente estabilidade o delineamento de experimentos (DOE), uma técnica estatística que tem recebido grande aceitação nos últimos anos, tem se mostrado um ingrediente essencial para revelar o efeito das variáveis que afetam a qualidade do produto ou a eficiência do processo.

Uma síntese das dezenas de aplicações práticas de Delineamento de Experimentos na indústria, entre 2001 e 2005, foi recentemente publicada em importante periódico.⁽¹⁾ O estudo apresenta evidências da crescente popularidade da metodologia, descreve o tipo de projeto experimental mais utilizado, o tamanho do experimento, o número de fatores que influenciavam a variável resposta e o setor do segmento industrial onde o estudo foi realizado.

No campo da laminação, dois bons exemplos do uso desta ferramenta podem ser mencionados. Em um deles, se utilizou a técnica do planejamento fatorial fracionado para reduzir a variação de espessura de aços especiais laminados a frio e utilizados no segmento de mercado de bebidas carbonatadas.⁽²⁾ O outro aborda um estudo de caso realizado na Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, para reduzir marcas de vibração em tiras de aço laminadas a frio, enfocando principalmente a importância de reinicializar o nível dos fatores e aleatorizar a ordem das corridas experimentais na obtenção do modelo que levou a minimização dos defeitos.⁽³⁾

O presente estudo foi realizado com foco na busca de adequação dos parâmetros de produção e procedimentos operacionais para redução dos desvios de qualidade no processo de laminação a quente de tiras de aço, usadas em geral como matéria-prima para fabricação de embalagens de folha metálica para produtos alimentícios.

Além do objetivo a que se propõe, a redução do desvio por temperatura baixa de acabamento em aços laminados a quente, espera-se com este trabalho contribuir para a difusão do uso do DOE na rotina diária do laminador.

2 O ESTUDO DE CASO

2.1 Apresentação do Problema

O estudo de caso objeto deste artigo foi realizado em uma siderúrgica brasileira, no processo de laminação de tiras a quente, onde inúmeras variáveis, entre elas, velocidades, forças de laminação, taxas de redução e temperaturas, devem ser apropriadamente ajustadas para a transformação de placas grossas de aço em um laminado plano de qualidade. O fluxograma de alto nível do processo é apresentado na Figura 1.

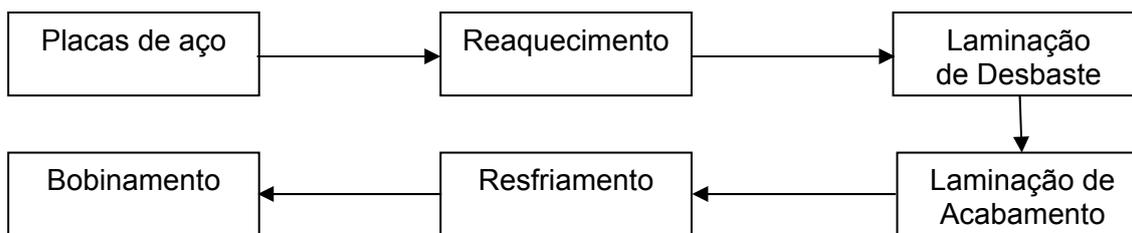


Figura 1. Fluxograma de alto nível do processo de laminação a quente.

A temperatura necessária ao reaquecimento das placas provoca a formação de carepa na superfície, camada esta subsequentemente eliminada pela ação de jatos de água direcionados (descamação), que simultaneamente resfriam o metal a ser mecanicamente trabalhado. Como a temperatura de entrada da tira de aço nos laminadores é um imperativo para promover as qualidades metalúrgicas projetadas para o produto, estabelece-se um cenário em que se torna necessário conhecer as variáveis do processo que afetam esta temperatura e determinar a melhor faixa de trabalho para cada uma delas.

Para alcançar estes objetivos, no presente estudo aplicou-se o delineamento de experimentos para abordar um problema de baixa temperatura em aços laminados a quente destinados à fabricação de tiras laminadas (espessuras até 2,4 mm) no laminador de acabamento e, adicionalmente, desenvolveu-se um gráfico de controle específico ao monitoramento da temperatura da tira.

3 O DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

O planejamento experimental foi iniciado com seções de *brainstorming* envolvendo os membros da equipe técnica do setor na busca de potenciais fatores de controle a considerar no estudo. O produto destas discussões, durante as quais 14 potenciais fatores foram sugeridos, está representado no diagrama de causa e efeito (Figura 2).

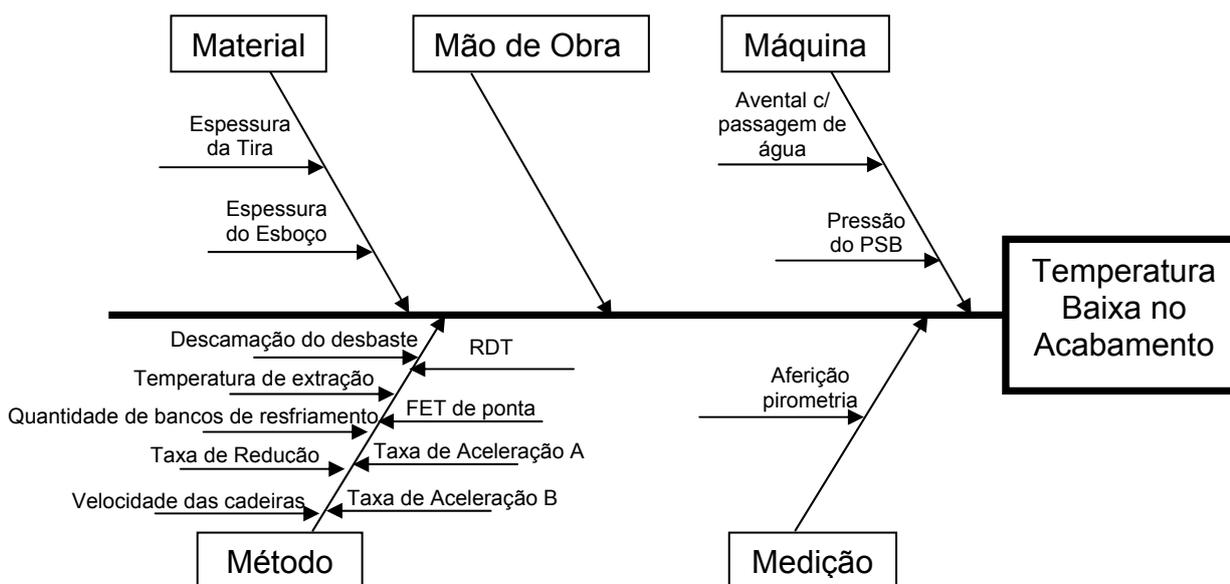


Figura 2. Diagrama de causa e efeito para o problema.

Dentre os quatorze fatores potenciais identificados, sete, brevemente descritos no Quadro 1, foram escolhidos para o estudo.

Quadro 1. Breve descrição dos fatores selecionados para o experimento

Fator de Controle	Breve Descrição
Espessura do Esboço	Espessura de entrada para o trem acabador
Espessura da Tira	Espessura de saída da cadeira F#1 do trem acabador
Velocidade das Cadeiras	Velocidade do cilindro da cadeira F#1
Taxa de Aceleração A	Taxa de aceleração após F#7 até bobinadora
Taxa de Aceleração B	Taxa de aceleração após mordida na bobinadora
RDT	Temperatura de saída do desbaste
Descamação do Desbaste	Número de jatos de águas

3.1 Seleção do Projeto Experimental

A escolha do projeto experimental é muito importante para o sucesso de qualquer experimento industrial e depende da natureza do problema, dos recursos disponíveis para a experimentação e da resolução do projeto.

No presente estudo desejava-se estudar cada um dos sete fatores selecionados em dois níveis cujas faixas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Fatores e níveis selecionados para o experimento

Fator de Controle	Legenda	Unidade	Nível (-1)	Nível (+1)
Espessura do Esboço	A	mm	33,7 a 35,7	35,8 a 37,8
Espessura da Tira	B	mm	15,4 a 17,9	18 a 20,5
Velocidade Cadeiras	C	mpm	51,9 a 75,0	75,1 a 98,2
Taxa Aceleração A	D	mpm/s	4,4 a 6,2	6,3 a 8,1
Taxa Aceleração B	E	mpm/s	6,9 a 18,4	18,5 a 30
RDT	F	°C	1.029,5 a 1.064,2	1.064,3 a 1.099
Descamação Desbaste	G	quantidade	3 a 7	8 a 12

Baseado nesta perspectiva foi adotado o planejamento fatorial fracionado 2^{7-3} , resolução IV, que é comumente usado com propósitos exploratórios nas etapas iniciais de investigação. Este arranjo requer apenas 16 corridas experimentais e permite separar os efeitos principais dos efeitos das interações de segunda ordem.⁽⁴⁾

A fim de minimizar o efeito do ruído (caso ele existisse) as corridas experimentais foram realizadas de modo aleatório. A aleatorização é um dos princípios fundamentais do planejamento experimental sendo empregada para garantir que um pressuposto básico seja atendido, isto é, que o erro experimental seja uma variável aleatória independentemente distribuída.

Para estimar a variação devida ao erro experimental, cada corrida foi replicada duas vezes (isto é, $n=2$). A replicação aumenta a precisão do experimento reduzindo o desvio padrão usado para estimar os efeitos dos fatores.⁽⁴⁾

A Tabela 2 apresenta o arranjo experimental utilizado, a ordem padrão e aleatorizada das corridas e os resultados obtidos (valores codificados pela subtração da média).

Tabela 2. Arranjo Experimental e valores da resposta (temperatura de acabamento) no experimento

Ordem Experimental		NÍVEL DOS FATORES							Temperatura (°C)	
padrão	aleatorizada	A	B	C	D	E	F	G	(*)	
1	15	1	1	-1	-1	-1	1	1	24,2	-6,2
2	8	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-6,2	-3,9
3	4	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-13,3	-6,2
4	5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-10,9	-6,2
5	11	1	1	1	-1	1	-1	-1	-15,6	-10,9
6	16	1	-1	1	-1	-1	1	-1	24,2	26,6
7	2	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-3,9	5,5
8	9	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1,6	-1,6
9	13	1	-1	-1	1	1	1	-1	-10,9	-8,6
10	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-8,6	-6,2
11	6	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-20,3	-15,6
12	14	1	1	-1	1	-1	-1	-1	21,9	33,6
13	3	1	1	1	1	1	1	1	-1,6	17,2
14	10	-1	1	-1	1	1	-1	1	-15,6	-15,6
15	7	-1	1	1	1	-1	1	-1	19,5	24,2
16	12	-1	-1	-1	1	-1	1	1	0,8	-8,1

(*) - dados codificados subtraindo-se de cada valor a média amostral.

3.2 Interpretação dos Resultados e Análise Estatística

A análise estatística do experimento consiste primariamente em calcular os efeitos de cada fator e das interações existentes. Estes resultados são apresentados na Tabela 3. Nela se observa que os efeitos dos fatores A, E, F e G e das interações A*E, B*D e A*B*D são estatisticamente significativos ($p < 0,05$) e influenciam a temperatura de acabamento.

Tabela 3. Efeitos principais e de interações, coeficientes de regressão e valor-p

Termo	Efeito	Coeficiente	Valor- p
Constante		0,000	1,000
A	8,688	4,344	0,005
B	5,187	2,594	0,067
C	1,313	0,656	0,626
D	2,687	1,344	0,324
E	-11,437	-5,719	0,001
F	12,562	6,281	0,000
G	-8,688	-4,344	0,005
A*B	1,812	0,906	0,503
A*C	-3,563	-1,781	0,197
A*D	-2,188	-1,094	0,420
A*E	-7,063	-3,531	0,017
A*F	-4,813	-2,406	0,087
A*G	2,187	1,094	0,420
B*D	13,063	6,531	0,000
A*B*D	6,188	3,094	0,033

A identificação dos efeitos pode também ser realizada através do uso de uma ferramenta gráfica na qual os efeitos dos fatores e das interações é plotado contra probabilidades da normal cumulativa (Figura 3).

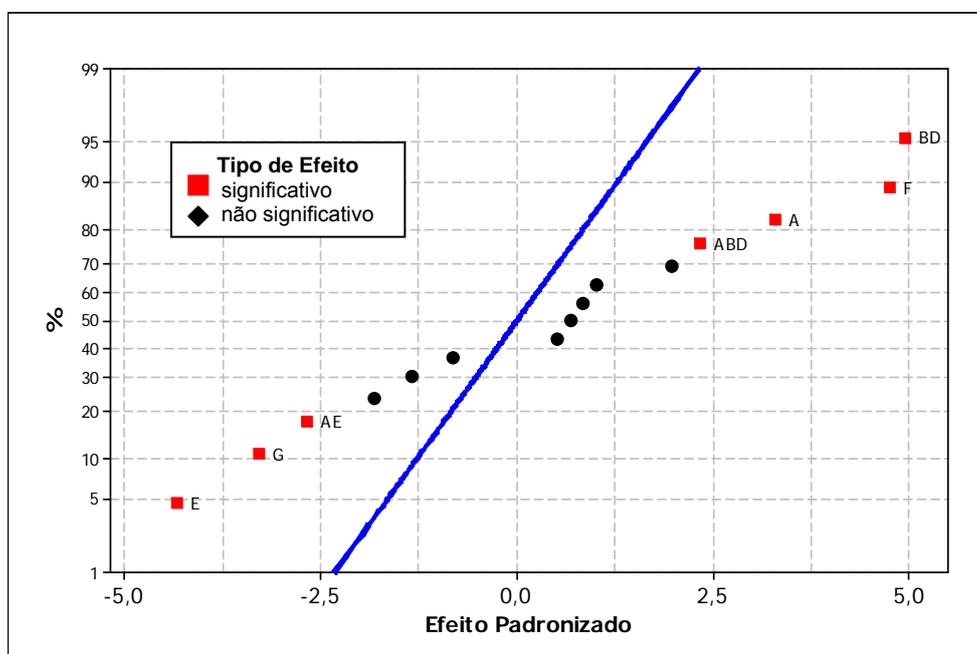


Figura 3. Gráfico dos efeitos padronizados.

Observa-se neste gráfico que os efeitos significativos dos fatores e interações estão afastados da linha reta resultante. Nesta análise o nível de significância é $\alpha=5\%$. A Análise de Variância (Tabela 4) confirma de forma sintética e resumida os efeitos dos fatores e de suas interações.

Tabela 4. Análise de Variância para a temperatura (unidades codificadas)

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	p
Efeitos principais	7	3.803,5	543,3	9,72	0,000
Interações duplas	7	2.153,7	307,7	5,50	0,002
Interações triplas	1	306,3	306,3	5,48	0,033
Erro residual	16	894,5	55,9		
Total	31	7.158,0			

3.3 Escolha dos Níveis Ótimos para os Fatores Importantes

O objetivo neste estudo foi determinar os níveis dos fatores de controle que permitem alcançar maiores temperaturas de acabamento. Neste caso, com base nos resultados encontrados, o fator “F” deve operar no nível (+1) e os fatores “A”, “E” e “G” devem ser operados no nível (-1). Corridas de confirmação realizadas posteriormente a este estudo têm confirmado a adequação destes fatores e seus níveis para reduzir a taxa de não conformidades relacionadas a baixa temperatura de acabamento.

4 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

O monitoramento da temperatura da tira de aço é realizado através de medições plotadas em intervalos de 0,5 segundos e os resultados típicos encontrados, formando o perfil de temperaturas, são apresentados na Figura 4 (os valores estão codificados subtraindo-se a média do processo de cada observação).

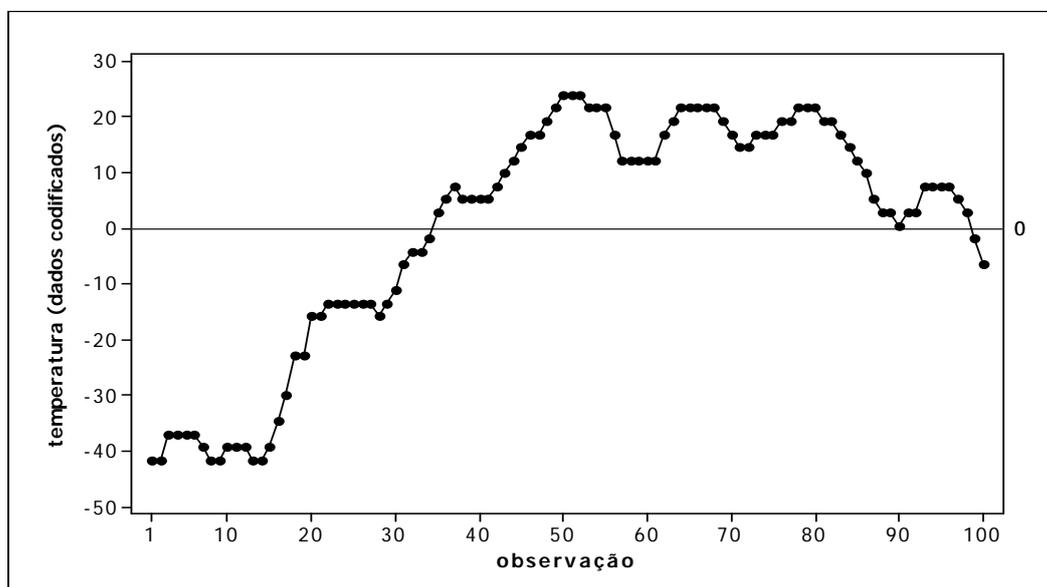


Figura 4. Perfil de temperaturas da tira de aço.

Percebe-se claramente que a média da distribuição dos valores não é constante, o que ocorre por influência da própria dinâmica do processo. Ademais, como as observações são tomadas a curtos intervalos, a série apresenta dependência em série, o que se confirma pela análise da função autocorrelação e da função autocorrelação parcial (Figuras 5 e 6).

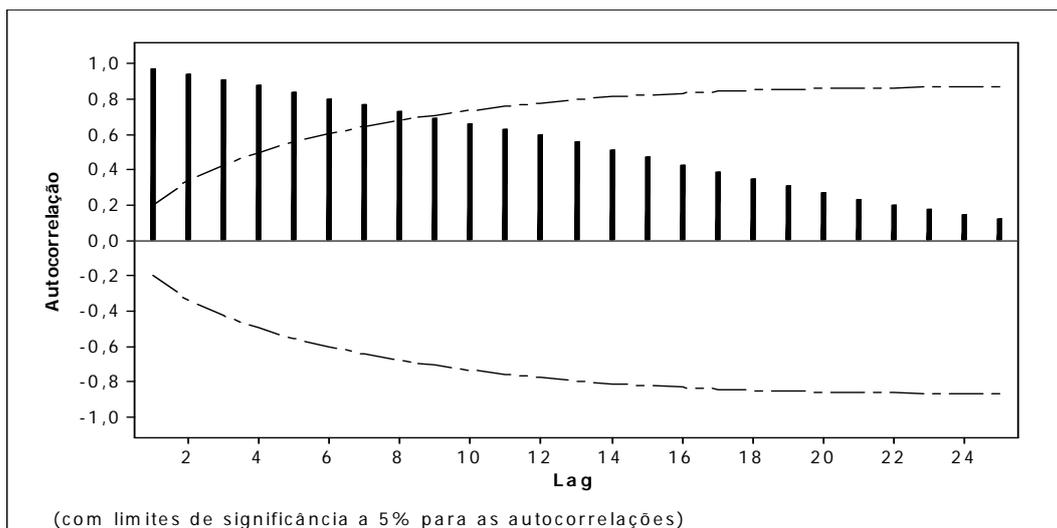


Figura 5. Função autocorrelação das temperaturas.

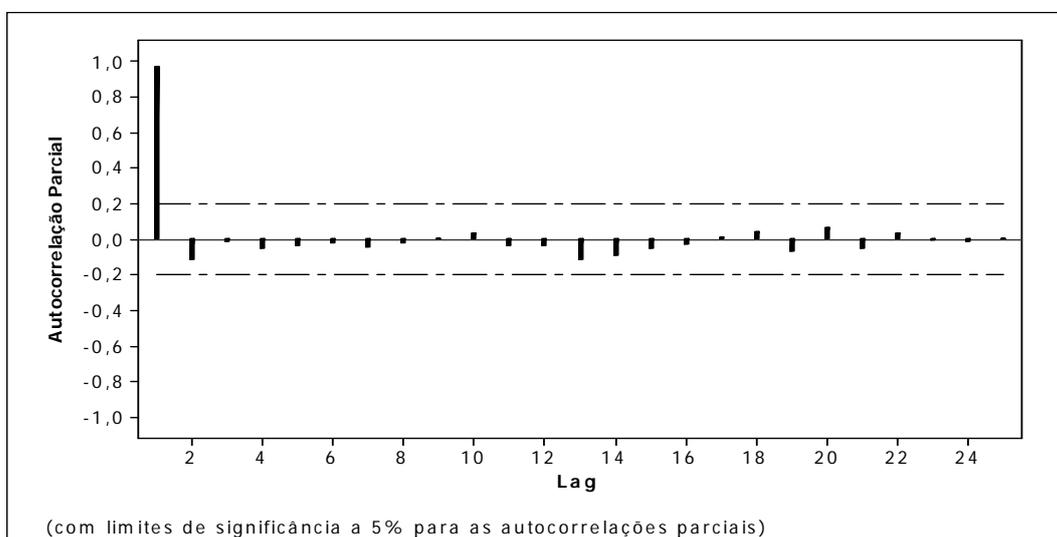


Figura 6. Função autocorrelação parcial das temperaturas.

Com base nesta análise verificou-se que a série de valores se ajustava a um modelo ARI (3,1) com coeficientes $\Phi_1=0,380$; $\Phi_2=0,344$; $\Phi_3=-0,157$ e constante 0,127. A qualidade do ajuste é expressa pela estatística do qui-quadrado, modificada por Box-Pierce (Ljung-Box), apresentada na Tabela 5. Maiores detalhes sobre este ajuste podem ser obtidos em consulta à literatura especializada.⁽⁵⁾

O uso deste modelo removeu a não-estacionariedade da média e, além disto, como seus resíduos são normal, independentes e identicamente distribuídos eles puderam ser usados como a estatística de controle em um gráfico convencional de observações individuais e amplitudes móveis (Figura 7).

Tabela 5. Estatística do qui-quadrado modificada de Box-Pierce (Ljung-Box)

Lag	12	24	36	48
Qui-Quadrado	5,0	28,3	44,4	54,0
Graus de Liberdade	8	20	32	44
valor-p	0,761	0,103	0,072	0,144

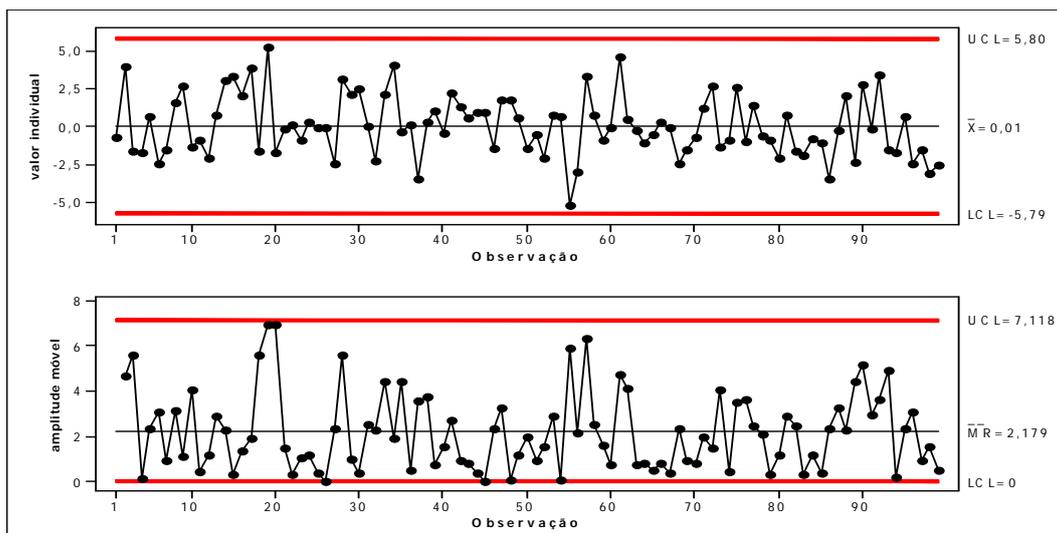


Figura 7. Gráfico de observações individuais e amplitudes móveis.

5 CONCLUSÕES

A aplicação do delineamento de experimentos possibilitou entender o comportamento das principais variáveis do processo e a maneira como elas interagem e influenciam a variável-resposta, isto é, a temperatura de acabamento. A partir deste conhecimento, os parâmetros importantes foram ajustados aos seus respectivos valores-alvo, conseguindo-se com que os problemas associados com a baixa temperatura de acabamento fossem reduzidos, trazendo reflexos altamente positivos em redução dos custos da má qualidade. O gráfico de controle, desenvolvido a partir do modelamento da distribuição de temperaturas ao longo da tira de aço, permite agir preventivamente no processo evitando a ocorrência de novas não conformidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao revisor do presente artigo por suas sugestões que contribuíram para melhorar a formatação e a clareza do texto.

REFERÊNCIAS

- 1 ILZARBE, L.; ALVAREZ, M. J.; VILES, E.; TANCO, M. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review; Quality and Reliability Engineering International; V. 24; p. 417-428; 2008.
- 2 GOMES, U. R. Otimização do processo de laminação a frio através de planejamentos de experimentos; Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 76 p.; 2007.
- 3 SALDANHA, I. C. C.; Aleatorização em planejamento de experimentos: um estudo de caso; Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 99 p.; 2008.
- 4 MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, 6th Ed., 643 p., 2005.
- 5 DEL CASTILLO, E. Statistical Process Adjustment for Quality Control, John Wiley & Sons, 357 p., 2002.