

REDUÇÃO DO REFUGO POR EMPENO DE TARUGOS DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA AÇOS VILLARES UTILIZANDO METODOLOGIA SEIS SIGMA¹

*Jeferson Souza de Oliveira*²
*Alexandre Gustavo*³
*André Siqueira Lima*⁴
*Marcelus Cavallare Cabral*⁵

Resumo

O empeno de tarugos do lingotamento contínuo é especialmente crítico em máquinas com leito do tipo empurrador, devido à diferença na velocidade de resfriamento entre as 4 faces do tarugo. Um tarugo empenado gera, além de problemas de manuseio na área produtiva, dificuldades no enformamento no forno de reaquecimento da laminação. A metodologia seis sigma foi utilizada para avaliar estatisticamente o comportamento das variáveis envolvidas no problema (tipo de aço, temperatura, velocidade de resfriamento), analisar as causas potenciais do empeno e testar possíveis soluções. Como resultado obteve-se uma redução de mais de 300% no índice de refugo por empeno, além de propiciar um maior controle do processo onde o operador pode atuar de forma preventiva.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Empeno; Seis sigma.

REDUCTION OF BENDING SCRAPPING INDEX OF CONTINUOUS CASTING FROM AÇOS VILLARES USING SIX SIGMA METHOD

Abstract

The billet bending is specially critical in casters with pushing cooling bed, due different cooling rate between four sides of the billet. The bended billet cause handling difficulties and problems during its charging to the heating furnace. The six sigma method was used to evaluate the behaviour of the variables in the case (steel grade, temperature, cooling rate), to analyse potential causes and to test possible solutions. Consistent reduction around 300% in the bending scrapping index was obtained and better preventive control also.

Key words: Continuous casting; Bending; Six sigma.

¹ Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² Supervisor Operacional de Lingotamento Contínuo – Aços Villares Pindamonhangaba

³ Supervisor Técnico de Lingotamento Contínuo – Aços Villares Pindamonhangaba

⁴ Controlador de Pátio de Tarugos – Aços Villares Mogi das Cruzes

⁵ Gerente de Gestão e Controle – Aços Villares

1 INTRODUÇÃO

O lingotamento contínuo é um processo onde o metal líquido é solidificado continuamente na forma de um tarugo semi-acabado, já cortado com um comprimento pré-estabelecido. Após o corte, os tarugos são encaminhados a um leito de resfriamento. Dois tipos de leito podem ser utilizados para este fim. No primeiro tipo, chamado empurrador, os tarugos são estocados lado a lado por um mecanismo que os empurra continuamente. O outro tipo utiliza um sistema *walking beam* onde a soleira do leito se move, com os tarugos separados entre si, onde o resfriamento das quatro faces é uniforme.

O leito *walking beam* tem a desvantagem de causar defeitos superficiais em certos tipos de aço suscetíveis a trincas quando resfriados rapidamente, daí a necessidade de um leito empurrador, onde a taxa de refrigeração dos tarugos é bem mais lenta do que no *walking beam*.

Entretanto, o leito empurrador tem como ponto negativo o resfriamento anisotrópico das quatro faces do tarugo. O primeiro tarugo saído do lingotamento tem contato direto com o ambiente por três faces, enquanto que uma das faces está em contato com o tarugo subsequente. Como consequência este primeiro tarugo troca calor de maneira anisotrópica com o meio, conduzindo a gradientes térmicos no interior da peça e a diferentes taxas de resfriamento em posições horizontalmente simétricas ao eixo central da peça.

A Figura 1 mostra um esquema das trocas térmicas que ocorrem nos tarugos. Como todas as peças tem aproximadamente a mesma temperatura, não há troca de calor nas faces adjacentes dos tarugos, por isso os tarugos trocam calor com o meio somente através das faces superior e inferior, exceto o primeiro, que além destas duas também troca calor com o meio pela face exposta. Os tarugos entram no leito a aproximadamente 800 °C e se resfriam através de radiação e convecção.

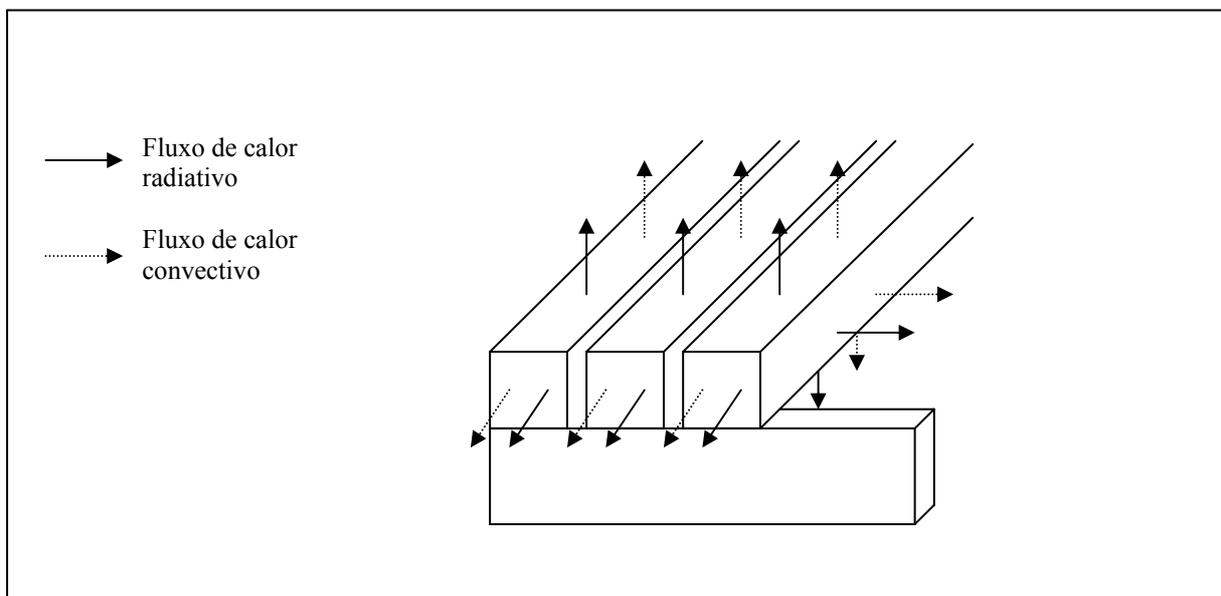


Figura 1. Esquema das trocas térmicas dos tarugos no leito de resfriamento

O resultado é que a face exposta ao ar “frio” do primeiro tarugo resfria rapidamente ao passo que a face oposta resfria lentamente, pois está adjacente à face “quente” do segundo tarugo, gerando gradientes térmicos no interior da peça e

diferentes taxas de resfriamento. A contração da face exposta gera tensões na face protegida, que se deforma plasticamente porque seu limite de escoamento é baixo (devido à alta temperatura). A face exposta resfria e contrai, ficando “menor” do que a face quente, ocasionando um arqueamento do tarugo, que dependendo da gravidade pode resultar no descarte do mesmo, pela impossibilidade de enformamento no forno de reaquecimento da laminação.

O problema pode ser mais crítico em aços com temperabilidade elevada. Neste caso o empeno está relacionado à ocorrência de transformação de fase, com forte expansão volumétrica. A transformação bainítica (expansão volumétrica de cerca de 4,5%) pode ocorrer na face exposta em temperaturas menores que 500 °C, enquanto a face oposta ainda está quente. De forma análoga ao fenômeno anterior, o tarugo empena porque uma face fica “maior” do que a outra (Figura 2).



Figura 2. Tarugo empenado por transformação de fase

2 METODOLOGIA SEIS SIGMA

O seis sigma é uma estratégia gerencial disciplinada e altamente quantitativa, que tem como objetivo aumentar a lucratividade das empresas por meio da melhoria da qualidade de produtos e processos. O objetivo do seis sigma é chegar muito próximo a zero defeito – 3,4 defeitos para cada milhão de operações realizadas. A Tabela 1 mostra o nível da qualidade da escala seis sigma.

A metodologia do seis sigma consiste em tomar decisões baseadas no raciocínio estatístico, levando em conta três aspectos principais:

- 1) Toda parte de um trabalho pertence a um sistema de processos interligados;
- 2) Todos os processos possuem algum tipo de variação;
- 3) Entender a variação é fundamental para a redução da mesma e alcance das metas.

Tabela 1. Escala seis sigma ⁽³⁾

Nível da qualidade	Defeitos por milhão (ppm)	Custo da não-qualidade (percentual do faturamento da empresa)
Dois sigma	308.537	Não se aplica
Três sigma	66.807	25 a 40%
Quatro sigma	6.210	15 a 25%
Cinco sigma	233	5 a 15%
Seis sigma	3,4	< 1%

O ponto forte da metodologia é a constituição de equipes para desenvolver projetos de melhoria com base em um método denominado *DMAIC*. Esta sigla representa as iniciais de 5 passos do método :

D=*Define* (Definir): definição de qual é o problema

M=*Measure* (Medir): medição e levantamento estratificado da natureza do problema

A=*Analyse* (Analisar): análise detalhada do problema e das prováveis soluções

I=*Improve* (Melhorar): execução em pequena escala das medidas de controle propostas

C=*Control* (Controlar): determinar padrões de trabalho a partir de medidas de controle realizadas com êxito

É praticamente inevitável alguma comparação com o método PDCA, já que o DMAIC também forma um ciclo de etapas, mas a grande diferença consiste na maior ênfase do método DMAIC no planejamento, que é separado em 3 etapas (DMA), detalhando o problema e suas causas, antes das tomadas de decisões eliminando o conceito de “tentativa e erro”.

3 MÉTODO

O empeno observado na área de resfriamento de tarugos do lingotamento contínuo pode ser dividido em três tipos distintos:

- 1) Empeno em arco: gerado por mudanças de fase e contrações do resfriamento do tarugo, faz com que a peça tenha a aparência de um arco
- 2) Empeno localizado na cabeça ou no rabo da peça: gerado por deformação mecânica devido ao desalinhamento dos empurradores do leito
- 3) Empeno em S: gerado por heterogeneidade no resfriamento do tarugo antes de chegar ao leito

A magnitude do empeno pode ser medida passando-se um cordão pelas duas extremidades do tarugo, medindo-se então a flecha do arco formado, como mostrado na Figura 3.

Para obtenção de uma base e panorama de processo destacaram-se os principais pontos que podem gerar empeno das peças, tais como refrigeração secundária do veio (zona de sprays), batentes do leito, empurradores, empilhamento e transporte.

Todo material sucateado começou a ser contabilizado em planilha, destacando-se todas as variáveis envolvidas no processo e o tipo de empeno. A partir daí pôde ser feita a estratificação necessária para o posterior tratamento estatístico, feito com o *software* Minitab[®]. Utilizou-se um experimento fatorial (DOE – *Design of Experiment*) para investigar os efeitos dos fatores relacionados em arranjos de variáveis relacionadas umas às outras, onde se pode verificar estatisticamente as variáveis significativas no processo.

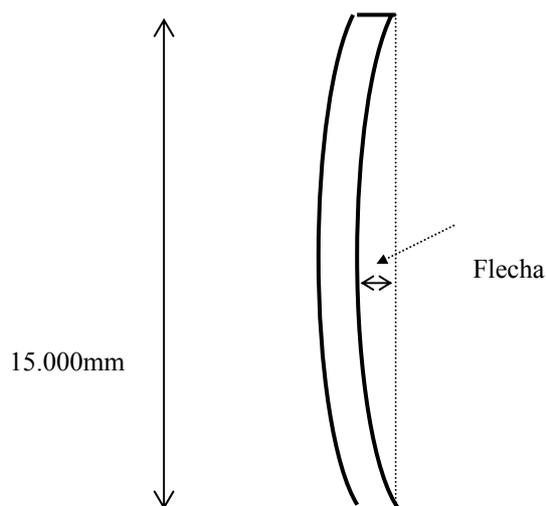


Figura 3. Método de medição de empeno.

Alguns conceitos importantes para a seleção desta técnica estatística se baseiam na possibilidade de:

- Estudar diversas variáveis ao mesmo tempo.
- Identificar o grau de influência de cada variável de um processo em presença de outras variáveis, também variando.
- Identificar o grau de interação entre variáveis.
- Requerer menos experiências e dados através de variações não planejadas ou com variações em separado de cada variável.
- Ajudar a identificar a hierarquia das variáveis que podem contribuir com a melhoria contínua.

O número de experimentos para uma combinação de variáveis é dado por X^Y , onde Y é o número de fatores ou variáveis e X o número de níveis associados com cada variável. Para o trabalho em questão foi realizado um experimento de 3 variáveis em três níveis, tendo como resultado uma matriz de $2^3 = 8$ experimentos (Tabela 2).

Tabela 2. matriz 2^3

Experimentos / Variáveis	A	B	C	Resultado
1	-	-	-	R1
2	+	-	-	R2
3	-	+	-	R3
4	+	+	-	R4
5	-	-	+	R5
6	+	-	+	R6
7	-	+	+	R7
8	+	+	+	R8
Alternância	2^0	2^1	2^2	

A influência de cada variável é calculada pela diferença do valor médio dos resultados obtidos com a variável no nível alto (+) e o valor médio da mesma variável em nível baixo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 mostra um gráfico que indica o grau de importância de cada um dos tipos de empeno verificados no índice de refugo total.

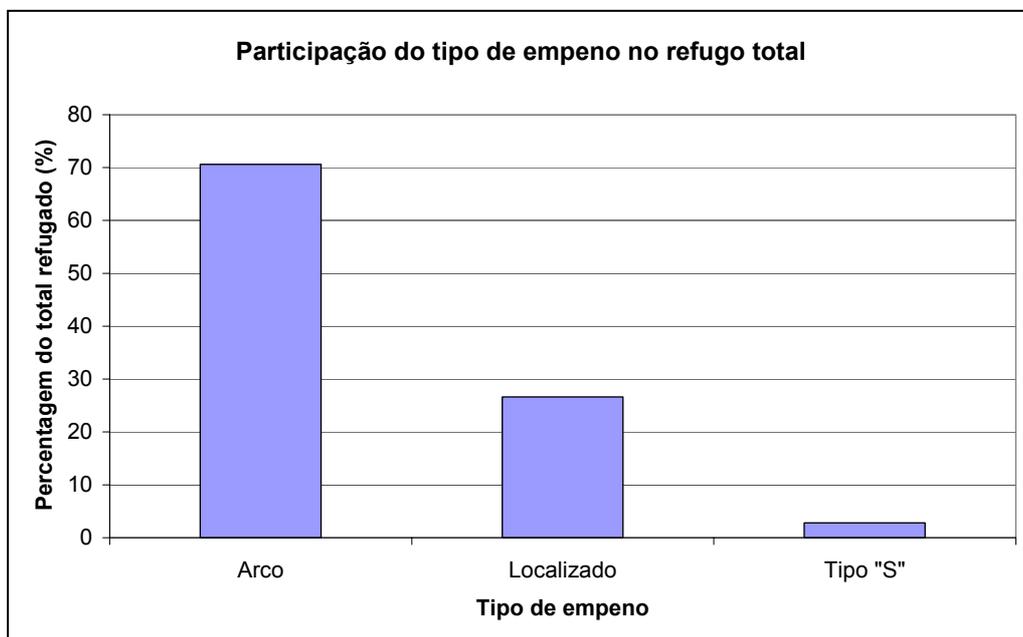


Figura 4. Participação do tipo de empeno no refugo total.

A Figura 5 mostra o índice de refugo bruto de tarugos por empeno em função do tipo de aço.

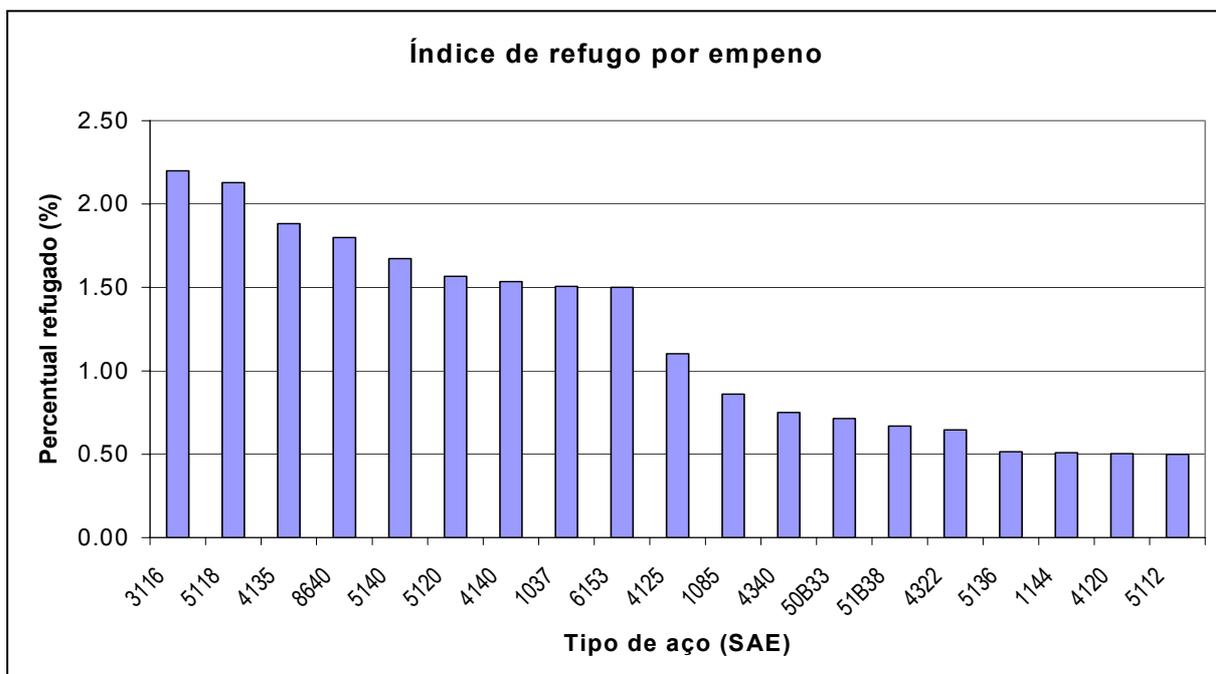


Figura 5. Índice de refugo de empeno por tipo de aço

Os resultados mostram que o tipo de empeno a ser atacado primeiramente é tipo arco. As ligas mais críticas em termos de refugo são as 31XX(baixo carbono), 41XX, 43XX, 51XX (com teor de carbono menor do que 0,25%) e 86XX.

Para avaliar-se a magnitude do empeno em função do tipo de liga, foram efetuadas medições em 100% dos tarugos de vários tipos de aço e plotados estatisticamente em gráfico pela ferramenta Minitab®. O resultado é mostrado na figura 6, onde a ordenada “delta” indica o comprimento da flecha do empeno, em mm.

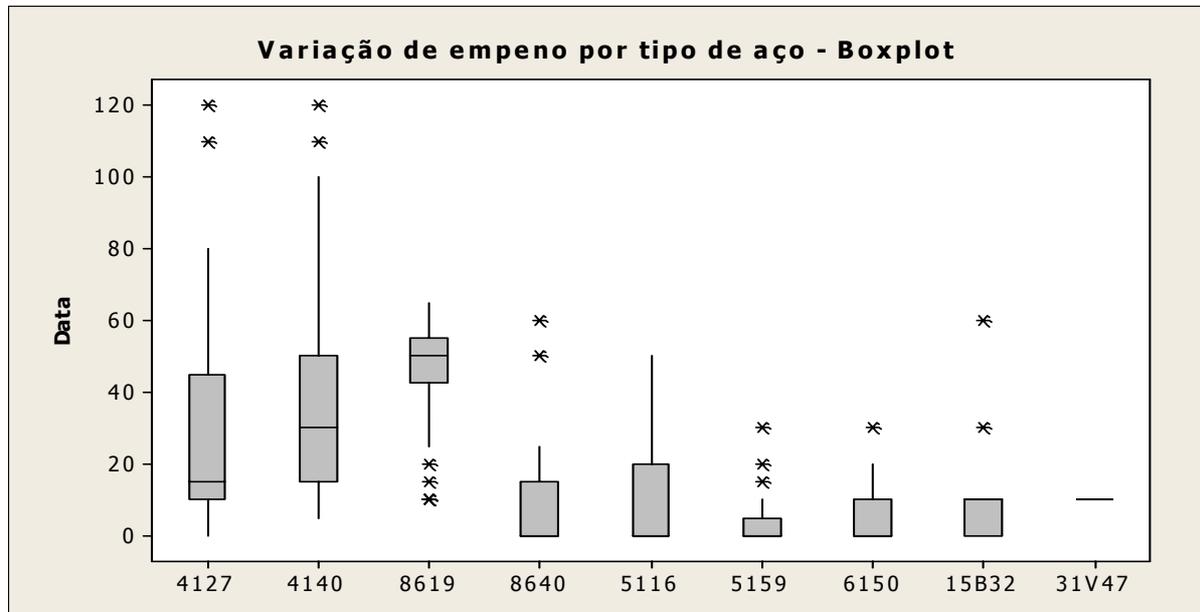


Figura 6. Magnitude de empeno por tipo de aço (SAE)

Os gráficos mostram que os resultados são coerentes: as ligas com maior percentual de refugo são também as que apresentam uma média maior na magnitude do empeno das peças, bem como uma maior amplitude na variação do comprimento das flechas. Não obstante estas são as ligas que apresentam maior temperabilidade, pelos teores mais altos de Cr e Ni, sendo mais suscetíveis à transformação de fase com expansão volumétrica.

Assim, o experimento fatorial DOE foi feito em 2 corridas do aço SAE 5120 (teor de Cr de 1,12 – 1,18%), avaliando-se em dois níveis: comprimento dos tarugos, utilização ou não de biombo (cavalete) para retardo no resfriamento dos tarugos no galpão e tempo de estadia dos tarugos no leito da máquina, conforme mostra a Tabela 3 (fatorial 2³).

Tabela 3. Variáveis do DOE

Fatores (variáveis)	Nível -	Nível +	Variável Resposta
Comprimento tarugo	13 m	14,8 m	Flecha de empeno em mm
Tempo de resfriamento	1:00h	3:00h	
Utilização de biombo	Com	Sem	

Fez-se um total de 8 grupos de 9 tarugos, em todas as possibilidades de combinações dos fatores acima. O resultado é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Experimento Fatorial

Biombo	t de resfriamento (h)	Comprimento (mm)	Flecha média (mm)	Grupo
Sem	1	13000	8,89	H
Com	1	13000	7,22	I
Sem	3	13000	19,44	J
Com	3	13000	17,78	K
Sem	1	14900	15,56	E
Com	1	14900	10,56	D
Sem	3	14900	27,22	F
com	3	14900	33,75	G

O gráfico da Figura 7 mostra um pareto relacionando as variáveis do experimento. Assim, o fator mais importante para o empeno deste tipo de aço é o tempo de resfriamento na mesa do leito, sendo o único fator que atingiu a linha de significância da análise de experimento (erro do experimento). Em menor magnitude de influência aparece o comprimento do tarugo e com uma influência muito pequena a utilização do biombo. A relações entre flecha de empeno e utilização de biombo, tempo de resfriamento e comprimento do tarugo são mostradas no gráfico da Figura 8.

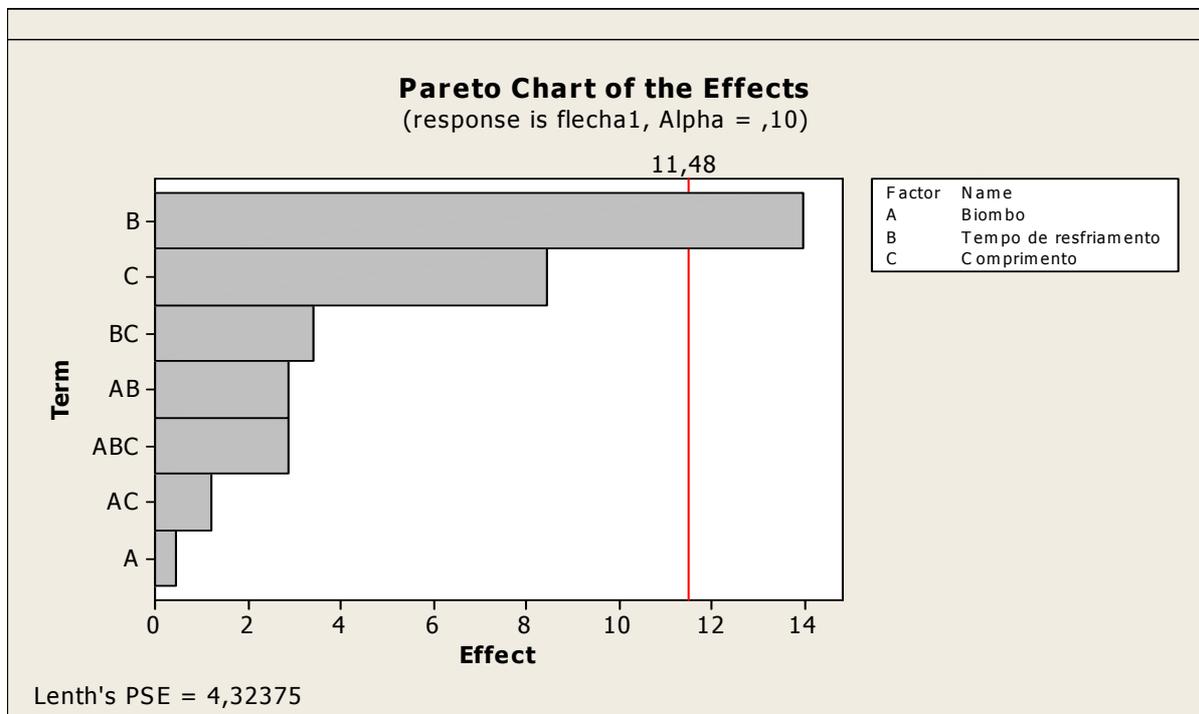


Figura 7. Influência das variáveis na flecha de empeno

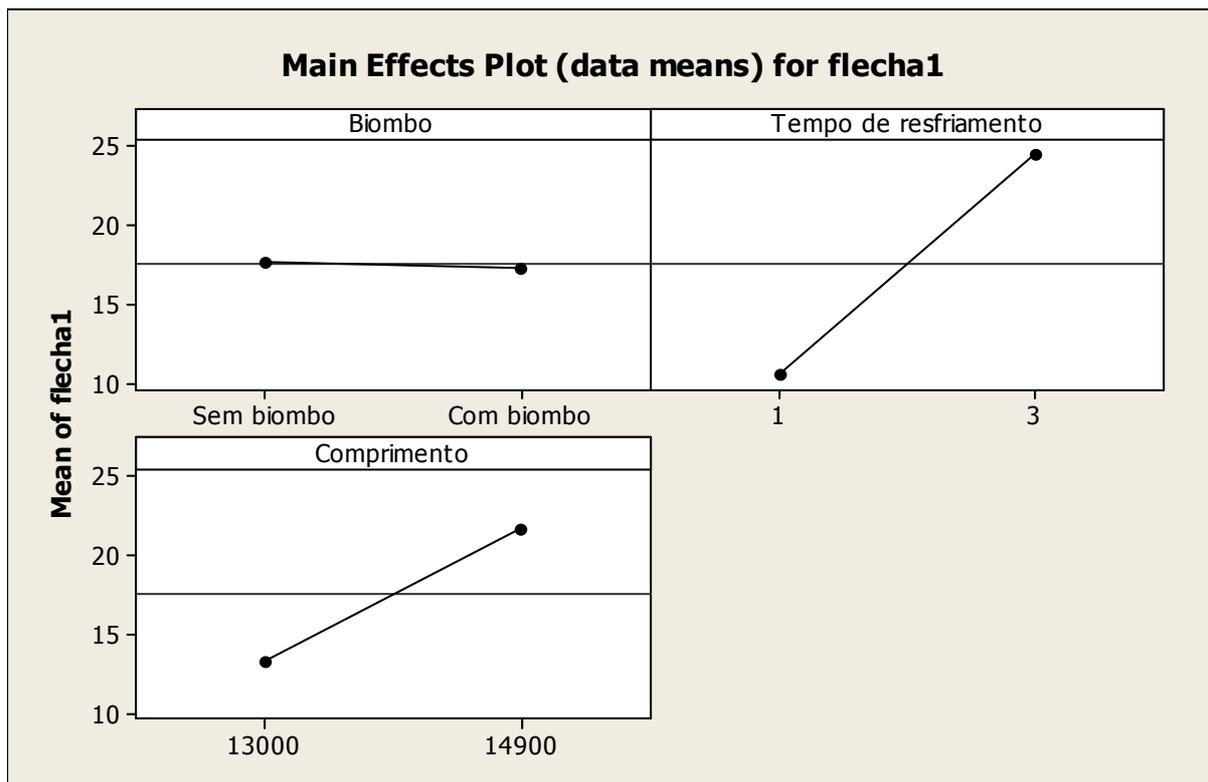


Figura 8. Utilização de biombo x flecha, tempo de resfriamento x flecha e comprimento do tarugo x flecha.

A Figura 9 mostra um gráfico com a evolução do índice de refugo por empeno ao longo do ano de 2005. O problema se intensificou a partir do mês de fevereiro, quando decidiu-se aumentar o comprimento final do tarugo lingotado.

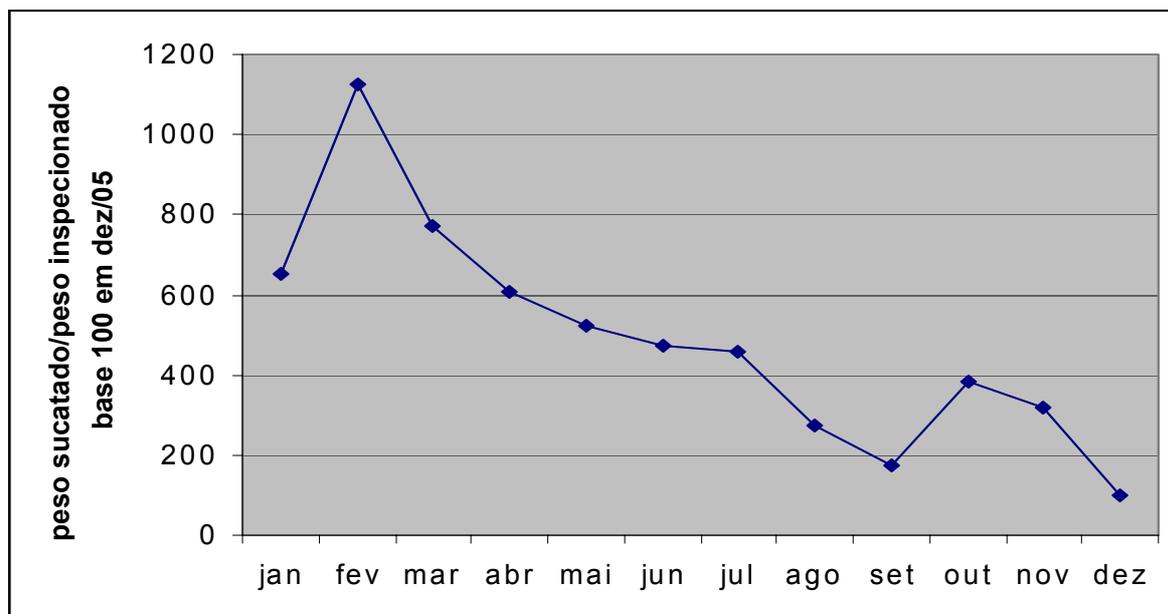


Figura 9. Índice de refugo por empeno no ano de 2005

Desde o início do trabalho, em março de 2005, conseguiu-se diminuir o índice de refugo de 2,25% em fevereiro para 0,20% no mês de dezembro, a partir das

mudanças nos procedimentos de tempo de resfriamento de cada aço, utilização de encostos e outros cuidados relacionados a cada tipo de aço, baseando-se nos resultados experimentais.

5 CONCLUSÕES

O maior responsável pelo refugo de peças é o empeno tipo arco, nos aços de temperabilidade elevada, devido a maior suscetibilidade destes graus de aços à transformação de fase com expansão volumétrica.

A variável mais importante na magnitude do empeno da peça é o tempo de resfriamento no leito da máquina; um tempo excessivo pode levar a empenamento grave dos tarugos. O segundo fator mais importante é o comprimento final do tarugo: quanto maior este comprimento, maior será a flecha de empeno. Já a utilização ou não de cavaletes não influi de forma significativa no empenamento das peças.

O resultado final do trabalho foi uma diminuição do refugo por empeno em mais de 300%, além de propiciar aos operadores um maior conhecimento do processo e, por conseguinte, um controle mais apurado e principalmente preventivo.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHREWE, H. F. **Continuous Casting of Steel**. Stahl Eisen, Düsseldorf, 1987.
- 2 GOZZI, D. S. **Estudo do Problema de Empeno em Tarugos de Aço Provenientes de Lingotamento Contínuo**. Trabalho de Formatura USP, São Paulo, p 25-29, 2005.
- 3 WERKEMA, C. **Criando a Cultura Seis Sigma**. Werkema, Nova Lima, MG, 2004.
- 4 NETTO, A. C. **O Papel da Estatística no Gerenciamento de Processos**. Apostila de Curso, São Paulo, 1996.