

EMPREGO DA REGRESSÃO LINEAR COMO IMPORTANTE FERRAMENTA DE PROCESSO NA LINHA DE MARTÊMPERA¹

Tiago Andrade Carolino²
Jordão de Moura Ferreira³
Marcelo Ferreira Lucas⁴
Antenor Ferreira Filho⁵

Resumo

Este trabalho tem a finalidade de apresentar o uso da ferramenta de Regressão Linear Múltipla no processo contínuo de martêmpera da Brasmetal Waelzholz, na qual se baseou em um rico histórico de variáveis acumuladas ao longo dos anos, para a determinação de um modelo matemático que o represente adequadamente. Temperatura, tempo e transformação são elementos chaves para a rotina de tratamento térmico, sendo que a composição química do material complementa os parâmetros de entrada, de maneira que as propriedades mecânicas do produto estejam dentro da especificação desejada do cliente na menor variação possível.

Palavras-chave: Regressão linear múltipla; Redes neurais; Tratamento térmico; Seis Sigma.

USING OF LINEAR REGRESSION AS IMPORTANT TOOL OF PROCESS IN THE LINE OF MARTEMPERING

Abstract

This paper aims to present the tool by Multiple Linear Regression in the continuing process of martempering Brasmetal Waelzholz, which was based on a rich historic of variables accumulated over the years, for the determination of a mathematical model to represent it properly. Temperature, time and processing are key elements to the routine of heat treatment, and the chemical composition of the material complements the input parameters, so that the mechanical properties of the product are within the desired specification of the customer at the lowest possible variation.

Key-words: Multiple linear regression; Neural network; Heat treatment; Six Sigma.

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 Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos da Brasmetal Waelzholz, Diadema – SP. tcarolino@brasmetal.com.br

³ Graduando em Engenharia de Produção, Analista da Gestão Integrada da Brasmetal Waelzholz, Diadema – SP. jferreira@brasmetal.com.br

⁴ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Supervisor da Gestão Integrada da Brasmetal Waelzholz, Diadema – SP. mlucas@brasmetal.com.br

⁵ Membro da ABM, Dr. Engenharia Metalúrgica, Diretor Industrial da Brasmetal Waelzholz,

⁶ Diadema – SP. afilho@brasmetal.com.br

1 INTRODUÇÃO

A utilização de têmpera e martêmpera em aços planos, sobretudo aqueles que necessitam de resistência mecânica e resistência ao desgaste elevada, vem substituindo o seu beneficiamento em peças acabadas. Aço é uma liga que contém até 2% de carbono, seja na forma combinada, seja na forma de solução sólida, acrescido de elementos de liga que irão conferir-lhe propriedades metalúrgicas particulares. Alguns dos elementos de liga presentes na composição química do aço podem provocar alterações nos posicionamentos das linhas de interface entre regiões que promovem as mudanças de fases.

A têmpera seguida de revenimento faz parte do processo de beneficiamento do aço, com o objetivo de torná-lo mais resistente, mais duro, aumentando assim sua resistência ao desgaste e sua resiliência.⁽¹⁾ Os produtos planos que mais empregam este material são as molas de segmentos, as facas de corte e vinco, componentes de rolamentos, ferramentas, serras entre outros, produzidos em linha de martêmpera contínua. Para conseguirmos estas particulares propriedades, o material é inicialmente aquecido acima das linhas AC3 e ACN do diagrama FeC (temperatura de austenitização), enriquecendo a austenita em carbono conforme a solubilidade permissível para uma determinada temperatura e composição química, além da dissolução dos carbonetos. Para isso é necessário tempo para que haja homogeneização de composição química e temperatura (velocidade já que as linhas são contínuas), seguido de um resfriamento rápido o suficiente para que toda austenita transforme-se em martensita (martensita foi o nome dado em homenagem ao Metalurgista Alemão Adolf Martens⁽¹⁾), com o cuidado para que seja evitado trincas e distorções no material. Cada material em particular possui uma temperabilidade, propriedade traduzida pela facilidade da austenita em se transformar na martensita que é em função do tempo, e pela faixa de temperatura de transformação que possui o início em um patamar e fim em outro mais baixo (características da composição química do aço). No processo de martêmpera da Brasmetal Waelzholz, a propriedade mecânica especificada pelo cliente seja ela dureza ou limite de resistência é determinado basicamente pela temperatura do revenimento, velocidade, e composição química, itens esses que fazem parte das variáveis do processo e deste trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado dados dos materiais com qualidade SAE 1070, a Tabela 1 fornece a sua composição química típica.

Tabela 1– Composição Química do Aço SAE 1070

Elementos % em peso	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr
SAE 1070	0,721	0,350	0,860	0,016	0,002	0,031	0,190

Os dados necessários para a realização deste estudo foram adquiridos através do sistema SCBWin - Sistema Cooperativo Brasmatal, e trabalhados em software EstatCampExcel Plus, em concordância com a filosofia 6 Sigma em

formato DMAIC, através das ferramentas: CEP – Controle Estatístico do Processo,⁽²⁾ M.S.A – Análise do Sistema de Medição, e a Regressão Linear Múltipla.^(3,4)

2.1 CEP – Controle Estatístico do Processo

A avaliação do controle estatístico do processo foi realizada para um determinado artigo (artigo é a codificação que trás as especificações do cliente), através da modalidade da carta para valores individualizados já que o ensaio de tração é um ensaio destrutível, e para efeito de processo um único ensaio é realizado para as extremidades do rolo. A Figura 1 mostra a carta CEP do processo antes da implantação da função matemática formatada através da Regressão Linear Múltipla e a Figura 2 a carta CEP do processo após implantação da função.

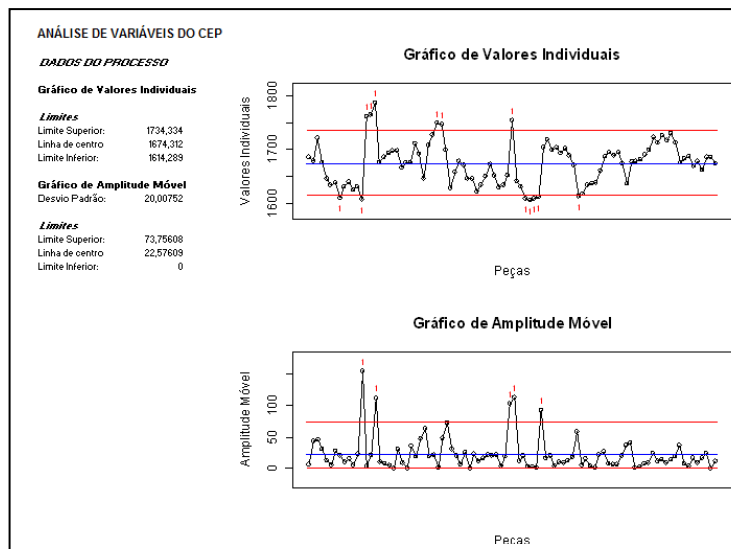


Figura 1 – Carta CEP para o artigo processado entre 2007 e 2008, antes da implantação do programa 6 Sigma e suas ferramentas.

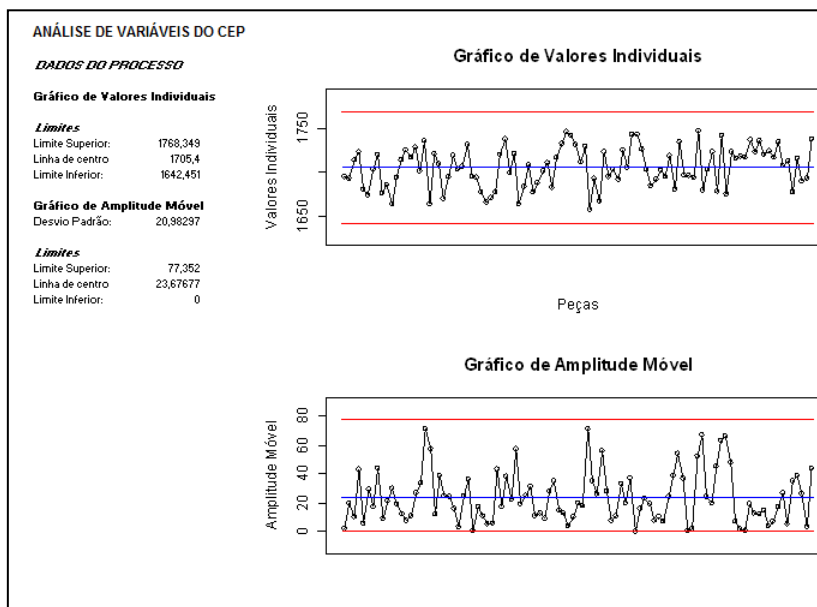


Figura 2 – Carta CEP para o artigo processado após 2008. Processo auxiliado pelo modelo matemático formatado pela Regressão Linear Múltipla.

2.2 M.S.A – Análise do Sistema de Medição

Um sistema de medição pode em muitos casos ser capaz de fazer uma avaliação incorreta do produto, repassando ao processo a responsabilidade pela não qualidade. Para isso uma análise do sistema de medição sempre é necessária, a fim de evidenciar o verdadeiro problema, a Tabela II mostra a análise para o ensaio de Limite de Resistência.

A Tabela 2 mostra fortes evidências contra a amostra (peça), P-valor menor do que 0,05, eliminando o fator operador da responsabilidade. Outra situação relevante está no fato de que em termos de contribuição, a peça agrega 98,94% na variabilidade, contra 1,056% do sistema de medição (repetitividade). No “Gráfico X-Barra” da Figura 3 a amplitude entre as linhas de controle (linhas vermelhas) mostram a repetitividade do sistema de medição, enquanto os pontos refletem a variabilidade entre as peças (processo produtivo), então, comparamos a repetitividade do sistema de medição com a variabilidade do processo produtivo e encontramos resultados confiáveis. A maioria dos pontos do gráfico deve estar fora dos limites de controle, significando que a variação do sistema de medição é pequena se comparada à variação do processo. Outro diagrama importante da Figura 3 é o “Gráfico Por Operador”, que é facilmente compreendido pela igualdade de patamar dos operadores A, B e C nas medições de Limite de Resistência.

Tipicamente a variação⁽⁵⁾ do sistema é definida como sendo igual a $6 * S$ (no qual S é o desvio padrão), e quando os dados são provenientes de uma distribuição Normal, aproximadamente 99,73% dos dados caem dentro de seis desvios-padrão (Repetitividade e Reprodutibilidade), sendo ± 3 desvios para cada lado a partir da média (vide resultados da Tabela 2

$$\text{Então: } 6 * 1,708 = 10,25 \text{ MPa. } (\pm 5,1 \text{ MPa})$$

Tabela 2 – Análise de Variância ANOVA

ANOVA	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrados Médios	Estatística F	Pr(>F)
Operadores	2	54,441	27,221	0,033	0,968
Peças	12	9878,329	823,194	282,206	0,000
Repetitividade	30	87,510	2,917		

TABELA DE CONTRIBUIÇÃO	Variâncias	Contribuição (%)
Repetitividade	2,917	1,056
Reprodutibilidade	0,000	0,000
Operadores	0,000	0,000
Peças	273,426	98,944
Repetitividade e reprodutibilidade	2,917	1,056
Total	276,343	100,000

VARIAÇÃO TOTAL E/OU TOLERÂNCIA	Desvio padrão	Variação total (%)	Tolerância (%)
Repetitividade	1,708	10,274	20,495
Reprodutibilidade	0,000	0,000	0,000
Operadores	0,000	0,000	0,000
Peças	16,536	99,471	198,427
Repetitividade e reprodutibilidade	1,708	10,274	20,495
Total	16,624	100,000	199,483

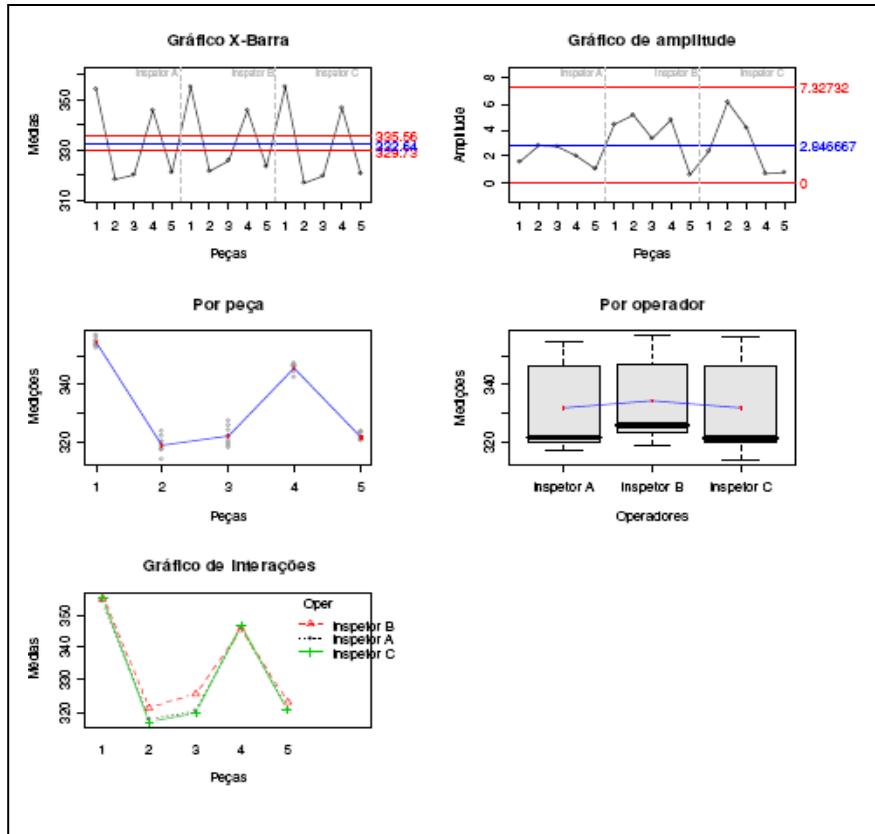


Figura 3 – Análise gráfica do sistema de medição.

O sistema de medição adotado pela Brasmetal Waelzholz é capaz e não tem interferência nos resultados.

2.3 Regressão Linear

Regressão Linear Múltipla é um modelo matemático que relaciona duas ou mais variáveis. A hipótese para testar a significância de um dado coeficiente da regressão linear está representada pelas equações A e B, e avaliado pela Tabela 3 e Tabela 4 através do P-valor, nota-se que o elemento P (fósforo) teve hipótese rejeitada no primeiro modelo.

$$H_0: \beta_j = 0 \quad (A)$$

$$H_0: \beta_j \neq 0 \quad , \text{ para } j = 0, 1, \dots, p \quad (B)$$

Tabela 3 –Tabela ANOVA para todas as variáveis inicialmente testadas

Tabela da Anova					
Fatores	G.L.	Soma Quad.	Quadrado Médio	Estat. F	P-Valor
Veloc	1	3744326,112	3744326,112	1674,579758	1,1014E-149
TRev	1	5782558,239	5782558,239	2586,14092	4,8276E-183
C	1	9111,422733	9111,422733	4,074913247	0,044150578
Si	1	14929,23627	14929,23627	6,676821442	0,010099415
Mn	1	15063,29308	15063,29308	6,73677584	0,009770691
P	1	235,6601025	235,6601025	0,105394569	0,745608897
Al	1	25185,95689	25185,95689	11,26394773	0,000861142
Cr	1	16697,67493	16697,67493	7,467722525	0,006542899
Residuals	426	952527,2928	2235,979561		

Resíduos					
Mínimo	1Q	Média	Mediana	3Q	Máximo
-196	-25,09	3,521	-6,442E-16	26,82	121,5

Desvio Padrão dos Resíduos	Graus de Liberdade	R ²	R ² Ajustado
47,28614555	426	0,909803975	0,908110152

Tabela 4 – Tabela ANOVA para as variáveis aceitas

Tabela da Anova					
Fatores	G.L.	Soma Quad.	Quadrado Médio	Estat. F	P-Valor
Veloc	1	3744326,112	3744326,112	1661,290656	2,8633E-149
TRev	1	5782558,239	5782558,239	2565,617866	1,1999E-182
C	1	9111,422733	9111,422733	4,042575619	0,04499427
Si	1	14929,23627	14929,23627	6,623835634	0,010398607
Mn	1	15063,29308	15063,29308	6,683314247	0,010062491
Al	1	19452,25014	19452,25014	8,630616148	0,003484638
Cr	1	12793,65901	12793,65901	5,676318126	0,017632196
Residuals	427	962400,6756	2253,865751		

Resíduos					
Mínimo	1Q	Média	Mediana	3Q	Máximo
-190,5	-26,9	3,406	5,028E-16	26,86	124,1

Desvio Padrão dos Resíduos	Graus de Liberdade	R ²	R ² Ajustado
47,47489601	427	0,908869051	0,907375101

R² é um valor que varia entre 0 e 1, trata-se de uma medida descritiva⁽⁴⁾ da qualidade do ajuste, ou seja, da variabilidade nos dados, com todo o cuidado podemos analisá-los e qualificá-lo como sendo bom para valores mais próximo de 1. Contudo regressões lineares com R² próximo de 1, podem não representar a variabilidade do processo, tornando a regressão bastante fragilizada, os valores descritos nas Tabelas 3 e 4, mostram valores de R² da ordem de 0,91.

Os resíduos não seguem distribuição normal, conforme P-valor em 1,044e-06, o que acaba dificultando a sua análise, contudo, o gráfico resíduos x ordem de coleta da Figura 3, trás evidência que o processo a partir da coleta 250 sofreu forte tendência à valores próximos de zero, o que reforça que um trabalho já está sendo realizado e que cuidados maiores foram tomados no processo nas últimas corridas. O Gráfico Resíduos x Valores ajustados, presentes na Figura 3, também conotam que o histórico é muito rico em valores que estão na faixa de 1.600 MPa a 1.800 MPa.

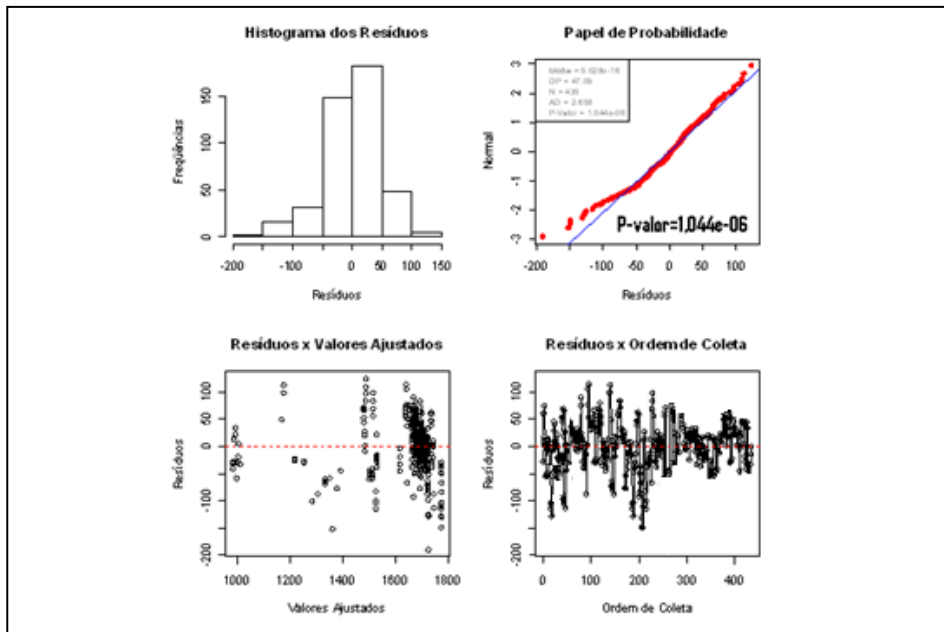


Figura 4 – Análise gráfica dos resíduos ou ruídos do banco de dados.

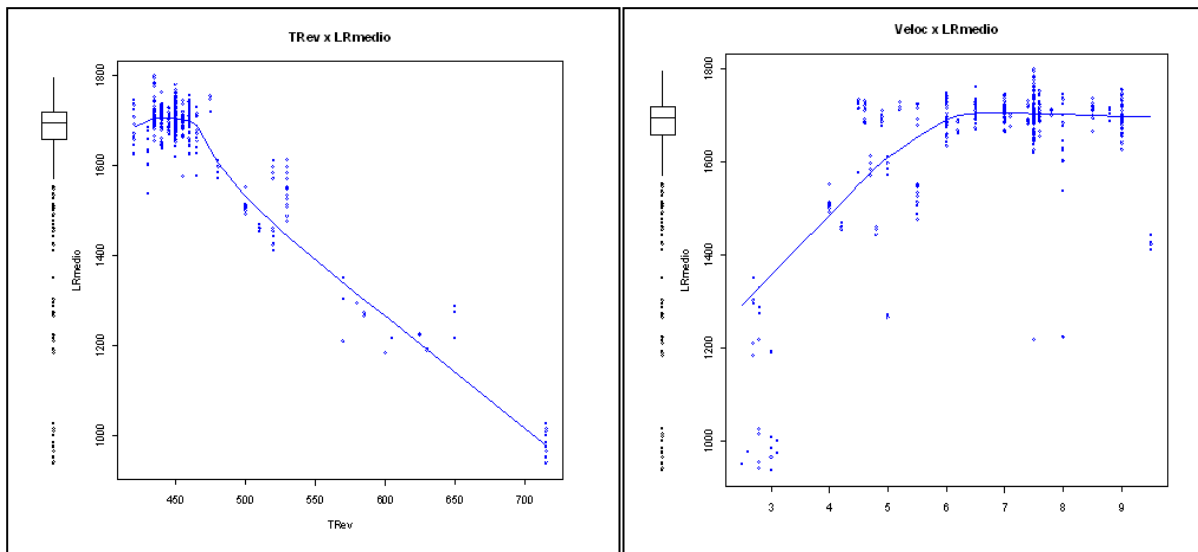


Figura 5 – Mostra a dispersão dos pontos de limite de resistência versus temperatura de revenimento no diagrama à direita e limite de resistência versus velocidade do material no diagrama à esquerda.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A carta CEP realizada antes do início deste trabalho, revelou que o processo estava fora de controle estatístico, mostrando que havia fortes evidências contra o sistema de medição e/ou processo. O ensaio de tração é capaz de medir a variação do produto, conforme estudos realizados, e que o tratamento térmico não se encontrava em situação de garantir o produto.

O segredo de uma boa regressão está agregada em rodar o modelo analisando o P-Valor de cada variável da Tabela 3 e 4 ANova em conjunto do R², e com a análise dos resíduos mostrados pelas Figuras 4 e 5.

As variáveis inicialmente testadas foram: Velocidade, Temperatura de Revenimento, Composição Química (teor de Carbono, Silício, Manganês, Fósforo, Alumínio e Cromo), em função da variável resposta Limite de Resistência. O elemento Fósforo foi rejeitado pela estatística P-valor. A equação (C) dá uma idéia de formatação de uma função matemática do processo.

$$LR = \pm K + (Vel * \pm c1) + (Trev * \pm c2) + (\%C * \pm c3) + \dots + (\%EL * \pm c4) \quad (C)$$

Onde: LR = Limite de resistência; K = Constante; Vel = Velocidade; Trev = temperatura de revenimento; c1, c2, c3,...,cN = coeficientes; %EL = % do elemento de liga.

4 RETORNO PARA A BRASMETAL

A Figura 6 mostra a porcentagem de melhoria para o índice da não qualidade após a implantação do trabalho, a Figura 7 trás a redução da sucata (descarte intrínseco do processo) e a Figura 8 os ganhos financeiros dos resultados.

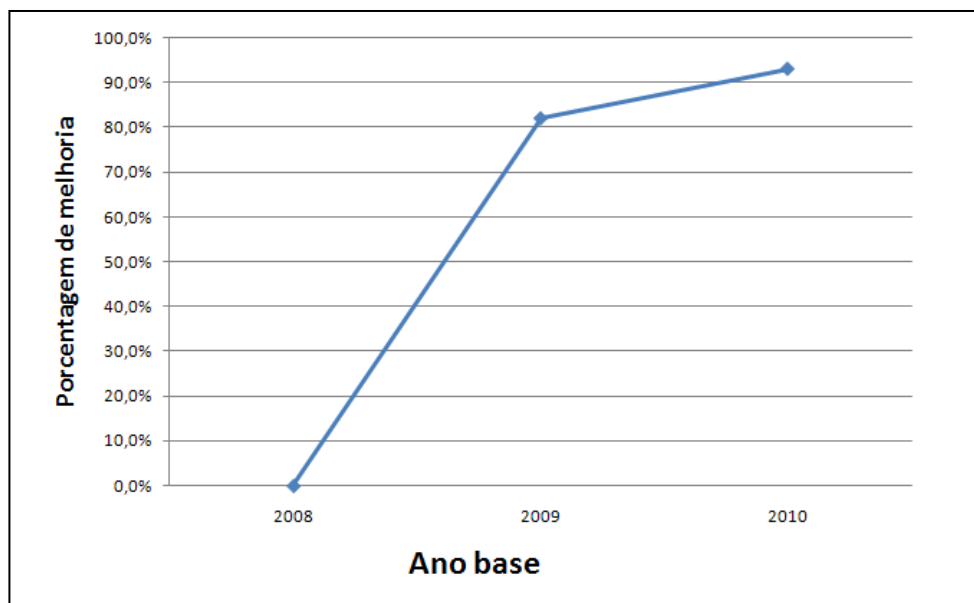


Figura 6 – Porcentagem das melhorias de redução das rejeições, retrabalhos e reclamações em relação a 2008. Em 2010 foi considerado o primeiro semestre.

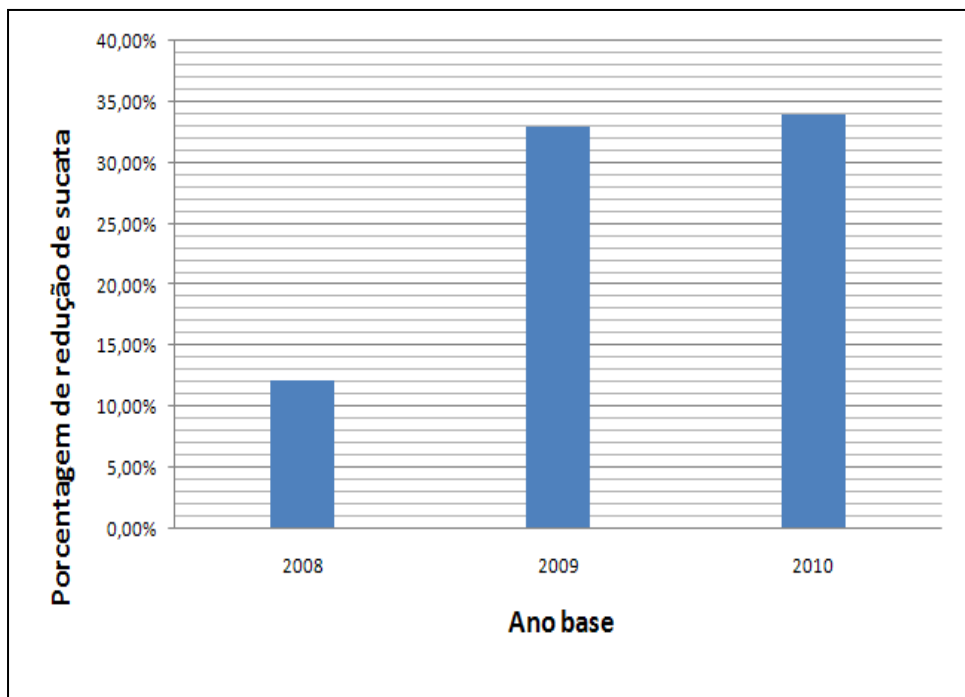


Figura 7 – Porcentagem de redução de sucata em função da meta inicial (base 2007). Em 2010 foi considerado o primeiro semestre.

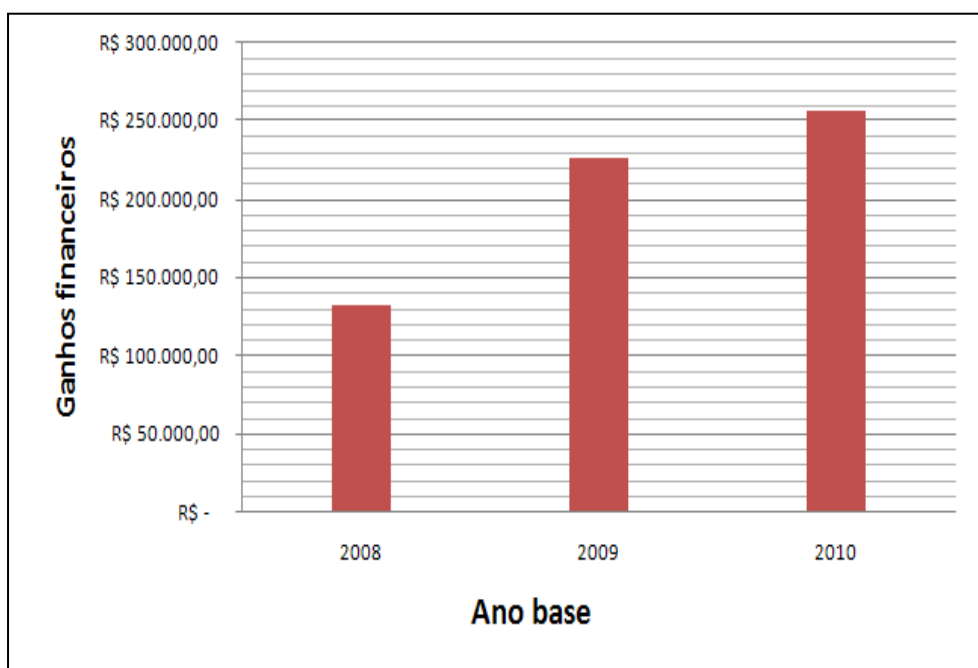


Figura 8 – Ganhos financeiros após a implantação do trabalho em 2008. Em 2010 foi considerado o primeiro semestre.

5 CONCLUSÃO

- O elemento Fósforo metalurgicamente pode influenciar no limite de resistência, contudo, a variação atual da matéria prima não detectou tal circunstância;

- Foi possível centralizar o processo, reduzindo a quantidade de retrabalhos, rejeições internas, reclamações e sucata dos nossos produtos;
- Com a centralização do processo, ganhos financeiros significativos foram alcançados;
- A Regressão Linear Múltipla foi bem aplicada no processo de tratamento térmico, trouxe grandes resultados e agregou valor ao *Know How* da Brasmetal Waelzholz;
- O emprego da filosofia 6 Sigma em processos principalmente aqueles que dependem de muitas variáveis são bastante satisfatórios.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Dorival Leão da EstatCamp Excel pelo apoio técnico aos projetos 6 Sigma da Brasmetal Waelzholz, ao Sr. Vinícius Fechio do Departamento de Garantia da Qualidade pela condução aos trabalhos de M.S.A, ao Gerente de Produção Marcelo Franck Bielskis e ao Supervisor da Produção Edwilson Leite pelo apoio e viabilidade.

REFERÊNCIAS

- 1 D.R. Askeland, P.P.Plulé, **Ciências e Engenharia dos Materiais**, Editora Cengage Learning, 2008, p.158-365.
- 2 D.Leão, **CEP – Controle Estatístico de Processo**, Editora EstatCamp, São Carlos, Julho de 2008, p.207-218.
- 3 R.Larson, B.Farber, **Estatística Aplicada**, 2.^a Edição, Editora Pearson, S.Paulo, 2008, p.361.
- 4 D.Leão, R.Pelissari, **Modelo de Regressão e DOE**, Editora EstatCamp, São Carlos, Novembro de 2008, p.55-56
- 5 V. Fechio, **Análise dos sistemas de medição MSA Sistema de medição não replicáveis**, Julho de 2009, Documento Interno.