



ADEQUAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PERFIS ASTM A572 G60 PARA PRODUÇÃO DE TORRES DE TRANSMISSÃO*

Izabelle Lannes Salgueiro Ferreira¹

Gabriela Martins Lazarotto²

Ilaciara Medeiros de Freitas³

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo adequar às propriedades mecânicas dos perfis ASTM A572 G60, através do estudo da influência dos parâmetros de processo de laminação e composição química do aço. Os perfis ASTM A572 G60, são utilizados nas indústrias de fabricação de torres de transmissão. A metodologia utilizada neste trabalho foi o desenvolvimento de um modelamento matemático, com base na ferramenta estatística de Análise de Regressão Múltipla. Através desta ferramenta foi possível obter previsibilidade de processo e identificar os parâmetros mais influentes nas propriedades mecânicas dos perfis ASTM A572 G60, o que possibilitou a determinação da composição química ideal do aço e os melhores parâmetros de processo de laminação.

Palavras-chave: Propriedade mecânica; ASTM A572 G60; Parâmetros de processo de laminação; Análise de regressão múltipla.

MECHANICAL CHARACTERISTICS ADEQUATION OF ASTM A572 G60 PROFILES FOR APPLICATION IN THE TRANSMISSION TOWERS PRODUCTION

Abstract

The present study aimed to suit the mechanical properties of ASTM A572 G60 profiles through the study of the influence of rolling process parameters and steel chemical composition. The ASTM A572 G60 profiles are used in the manufacturing of transmission towers industries. The methodology used in this work (PDCA) was the development of a mathematical model, based on the statistical tool of Multiple Regression Analysis. With this tool, it was possible to obtain predictability of process and to identify the most influential parameters on the mechanical properties of ASTM A572 G60 profiles, which allowed the determination of optimal chemical composition of steel and the best parameters of the rolling process.

Keywords: Mechanical properties; ASTM A572 G60; Rolling process parameters; Multiple regression analysis.

¹ Engenharia Metalúrgica UFF, Engenheira de Processo, Gerencia de Laminação a Quente, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.

² Engenharia Química UFPR, Engenheira de Processo, Gerencia de Produto e Processo, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.

³ Engenharia Metalúrgica UFF, Engenheira de Produto, Gerencia de Produto e Processo, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as principais razões para a utilização de torres de aço são a crescente demanda do sistema de telecomunicação e a expansão das linhas de transmissão de energia. Visando atender este atraente mercado de torres, a Votorantim Siderurgia desenvolveu uma linha de perfis de acordo com a Norma ASTM A572 G50 e G60 (2007) [1].

O desenvolvimento deste trabalho se fez necessário devido à dificuldade em atender as propriedades mecânicas dos perfis ASTM A572 G60.

Através da análise da capacidade de processo, foi possível identificar 17% de probabilidade de não atendimento dos resultados dos limites de escoamento dos perfis G60.

O presente trabalho teve por objetivo adequar às propriedades mecânicas dos perfis ASTM A572 G60. A metodologia utilizada foi o PDCA que possibilitou o desenvolvimento de um modelamento matemático, o qual correlaciona através da ferramenta estatística de Análise de Regressão Múltipla, a composição química do aço e os parâmetros de processo de laminação, para obter as propriedades mecânicas do produto.

A norma de referência utilizada neste trabalho para fabricação de perfis foia ASTM A572 G50 e G60 (2007), que permite a utilização de nióbio (Nb) e/ou vanádio (V) nos aços a fim de se obter as características mecânicas adequadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste projeto inicialmente foram coletados dados das propriedades mecânicas do material de interesse, pelo período de um ano e calculada a capacidade do processo, a qual indicou uma probabilidade de não atendimento à norma em 17%, com um nível sigma de 2,45.

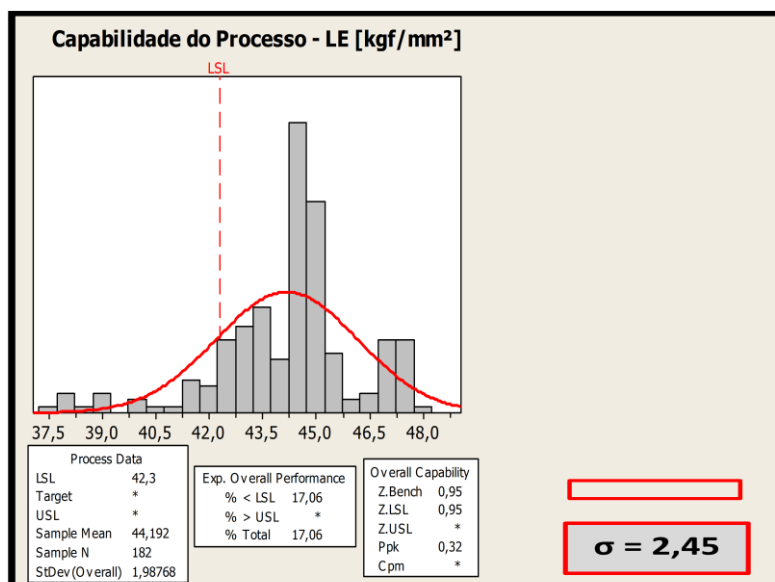


Figura 1 – Teste de capacidade do processo para o limite de escoamento das cantoneiras ASTM A572 G60.

A metodologia que se aplica para o nível sigma encontrado é o PDCA. Este método é simples, eficaz e composto por quatro etapas:

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



- 1ª) P (*plan* - planejamento): Identificar o problema, analisar as causas fundamentais e realizar o plano de ação;
- 2ª) D (*do* - fazer): Executar as ações planejadas;
- 3ª) C (*check*): Verificar a efetividade das ações;
- 4ª) A (*action*): Padronização e conclusão

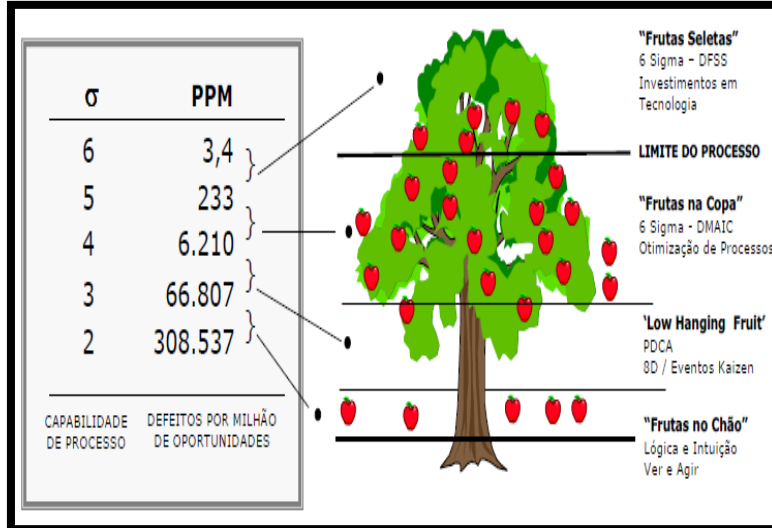


Figura 2 – Árvore de análise de nível sigma versus Metodologia adequada de projeto.

Durante a etapa do planejamento, foi realizado um documento de coleta de dados para identificar e registrar os parâmetros de processo do laminador (temperatura do forno, velocidade de laminação, percentual de redução, etc.).

REGISTRO DE PARÂMETROS DE PROCESSO									
Obs:	Laminador Contínuo de Perfis - Teste Composição Química Cant 100								
Material	Quantidade(t)	Nº de peças	Corrida	Início de enformamento	Horário de saída do forno (1ªbarra)	Velocidade (m/s)	GAP (s)	Curva de aquecimento	Temperatura Zonas 7 e 8
Cant 100x7 G60	16 t	9 tarugos	4000017384	24:02:00	2:14:00	3,53	15	2	1182
									1200
Temperatura tarugo saída do forno			Temperatura tarugo na G2			Temperatura G17	Temperatura leite	Tempo de água (nuvem meio)	Obs
Cabeça	Meio	Cauda	Cabeça	Meio	Cauda				
990	1020	995	890	900	890	950	*	12	* Não foi possível identificar a T no leite,
987	1010	990	887	890	890	953	*		
995	1014	987	880	877	870	954	*		
990	1012	995	904	894	892	949	855		
985	1010	986	892	880	861	950	849		

Figura 3 – Exemplo da tabela de registro de parâmetros de processo de laminação.

O aço utilizado para fabricação dos perfis A572 G60 era o 1520-B, com custo médio de liga de 87,97R\$/t, com a seguinte composição química:

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.


Tabela 1 – Tabela de composição química do aço 1520-B.

Material	Composição Química (%)												
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Sn	Ni	Cr	Mo	Nb	N	B
1520-B A572 G60	0,17	1,49	0,20	-	-	-	-	-	-	-	0,015	-	-
	0,22	1,60	0,30	0,04	0,05	0,35	0,10	0,30	0,20	0,10	0,030	125,00	-

Existem duas maneiras de se obter propriedades mecânicas nos metais e ligas metálicas, adequação da composição química ou tratamentos térmicos/termomecânicos [2-4].

Analisando os parâmetros de processo do laminador e a composição química do aço 1520-B, o primeiro experimento proposto foi utilizar o refinador de grão, Nb, no teor máximo permitido pela norma (Nb (%) = 0,030).

Após a realização do primeiro experimento, a análise de capacidade do processo identificou 22% de probabilidade de não atendimento das propriedades mecânicas especificadas na Norma ASTM A572 G60 e o custo médio da liga aumento de 87,97 R\$/t para 98,89 R\$/t.

Com base neste primeiro resultado, se fez necessário o estudo aprofundado do Nb em solução sólida, onde foi possível identificar que quanto maior o teor de Nb disponível na liga, maior é a temperatura necessária para garantir a solubilização deste elemento.

Conforme a tabela 2 a seguir, observa-se que para o teor de 0,015% Nb, a uma temperatura de 1130°C, 51,26% de Nb encontram-se em solução sólida, porém para 0,030% Nb, a temperatura necessária aumenta para 1259°C e o percentual de Nb em solução sólida cai para 20%, ou seja, apenas 20% do Nb adicionado na liga é eficaz como refinador de grão conferindo propriedade mecânica ao material [6-7].

Tabela 2 – Tabela de simulação de aços longos microligados ao Nióbio.

Technical Metallurgical Analysis for long products Microalloyed Nb			
Product	1520		
Thickness mm	10	10	10
Reheat temperature C	1050	1050	1050
Last Pass Temperature C	870	870	870
% C	0,2	0,17	0,22
% Mn	1,45	1,45	1,45
%Cu	0,35	0,35	0,35
% Ni	0,3	0,3	0,3
% V	0	0	0
% Nb	0,015	0,015	0,03
% Al	0	0	0
% Cr	0,2	0,2	0,2
% Mo	0,1	0,1	0,1
RESULTS			
%CE- (Pcm)	0	0,29	0,34
Temperature Recommended for Reheat to keep 100 % Nb in Solution f (C , Nb ,N)	1149	1130	1259
% Nb in Solution for the applied Temperature Reheat	0,007	0,008	0,006
Effective % Nb in solution for the applied Temperature Reheat	0,007	0,008	0,006
Factor Nb in Solution	43,960%	51,26%	20,075%
Effective N % f (% Al)	0,0125	0,0125	0,0125
Bainite Start-Bodnar	613	631	601
Bainite Start-Kirkaldy	563	565	562

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



O segundo experimento realizado foi adição de vanádio (V) ao aço 1520-B, tal decisão foi tomada baseada em dois princípios, primeiro que a norma ASTM A572 permite a utilização do V como refinador de grãos e como segundo pela limitação da temperatura de operação do forno de reaquecimento de 1200°C, neste caso, é sabido que o V solubilizar a aproximadamente 800°C, tornando-se adequado para a obtenção de propriedade mecânica do material. Neste experimento obtivemos 100% de atendimento as especificações da norma.

De acordo com a nova composição química o segundo experimento foi realizado, através da utilização do software estatístico *Minitab* um teste de correlação de melhor subgrupo de variáveis, que se destina a identificar as variáveis de entrada mais influentes na variável resposta (propriedade mecânica dos perfis).

Conforme a tabela 3, pode-se verificar que os parâmetros de processo mais influentes foram: temperatura do tarugo na saída do forno de reaquecimento (T_{G2}), percentual de Nb, V e Mn.

Tabela 3 – Tabela resposta da análise de melhor subgrupo para determinar a variável resposta.

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Cp	S	T_{G2}	T_{G17}	%Nb	%V	%Mn
1	77,6	71,2	3,6	1,5274				X	
1	76,7	70,0	3,9	1,5583					X
2	80,6	70,9	4,6	1,5347		X		X	
2	80,6	70,9	4,6	1,5364		X			X
3	82,6	68,6	5,9	1,5936	X	X		X	
3	82,3	68,2	6,0	1,6058	X			X	X
4	90,3	78,1	5,3	1,3323	X		X	X	X
4	83,8	63,6	7,5	1,7160	X	X	X	X	
5	91,1	73,4	7,0	1,4664	X	X	X	X	X

Após definidas quais as variáveis mais influentes no processo, foi realizado um modelamento matemático para definir uma equação que possibilitasse a previsão dos resultados das propriedades mecânicas. Este modelamento foi realizado através do software *Minitab*.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-93,75	89,57	-1,05	0,354	
T G2	-0,08517	0,03869	-2,20	0,092	8,343
%Nb	3113	1723	1,81	0,145	166,556
V%	2281	1053	2,17	0,096	2151,450
T saída forno	0,04280	0,03736	1,15	0,316	2,431
%Mn	51,91	24,86	2,09	0,105	1352,041

S = 1,33226 R-Sq = 90,3% R-Sq(adj) = 78,1%

Analysis of Variance Fator de Determinação Fator de Determinação Ajustado. Usado para comparar modelos

Indica se o fator de entrada exerce efeito significativo na saída. Manter os fator de baixo valor no modelo.

Figura 4 – Parâmetros retornados pelo software *Minitab* para análise e validação da equação.

Foram feitas várias simulações no software até encontrar uma equação matemática adequada.

A equação da regressão é:

$$Le = - 93,7 - 0,0852 T G2 + 3113 \%Nb + 2281 V\% + 0,0428 T \text{ saída forno} + 51,9 \%Mn$$

Figura 5 – Equação otimizada obtida (experimento 2).

Com base na equação encontrada foram calculados os valores ótimos a serem utilizados para atingir os valores das propriedades mecânicas adequadas.

A equação mostrou que a influência do vanádio na determinação das propriedades mecânicas, mesmo que em pequeno teor é muito superior a influência do Níóbio.

Utilizando os parâmetros ótimo determinado pela equação acima eliminamos o níóbio e realizamos um novo teste, contendo apenas o vanádio. Para este experimento foi desenvolvido um novo aço (1622).

Tabela 4 - Tabela de composição química do aço 1622.

Material	Composição Química (%)												Requisitos Adicionais
	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Sn	Nb	V	N	
1622-A	0,200	0,150	1,200	-	-	-	-	-	-	-	0,020	-	ASTM A572 G60
	0,240	0,300	1,350	0,030	0,030	0,250	0,150	0,150	0,060	-	0,035	0,010	

Após a realização do terceiro experimento a análise de melhor subgrupo de variáveis e o modelamento matemático foi refeito, visando validar os resultados obtidos.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

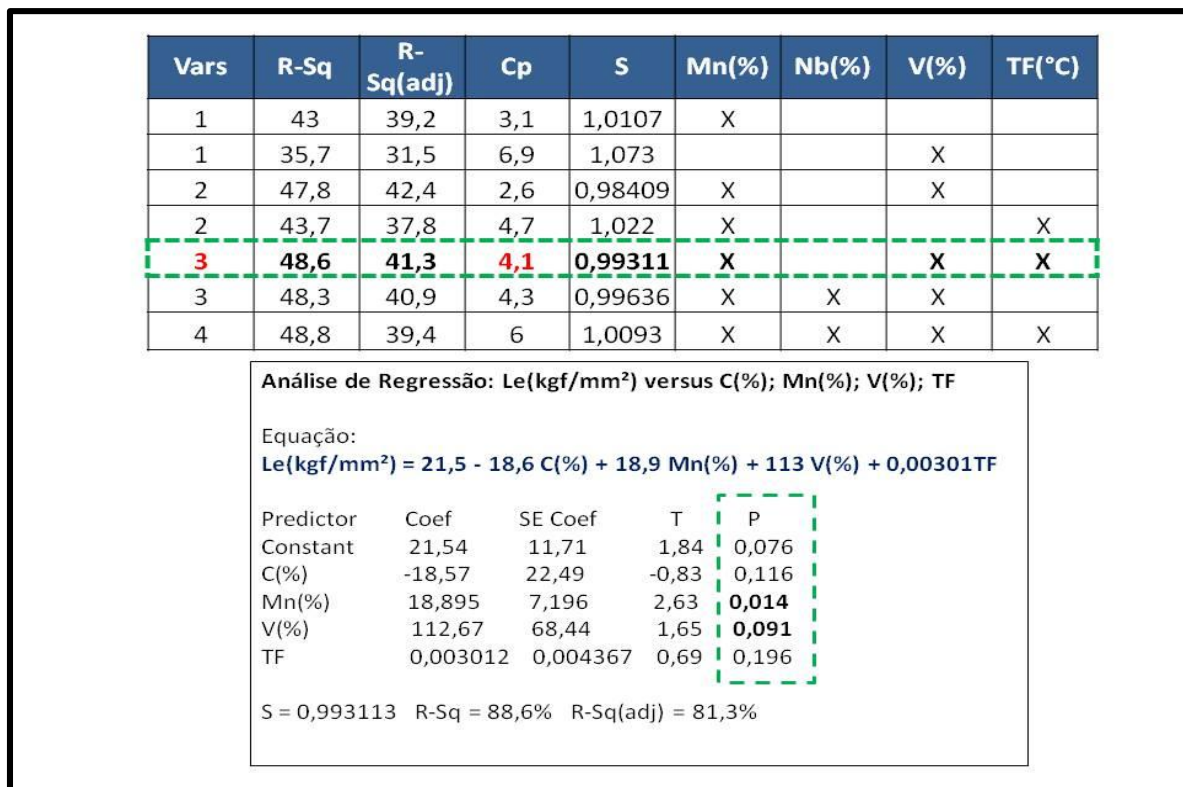


Figura 6 – Comprovação estatística da influência do Vanádio e geração de nova equação.

A equação final, encontrada através do modelamento matemático, foi validada e o erro médio encontrado foi de 1,85%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos experimentos estão representados a seguir no gráfico em formato de histograma, utilizado para determinar a capacidade do processo em atender ao limite inferior (LSL) das propriedades mecânicas, conforme Norma ASTM A572 G60 de 2007.

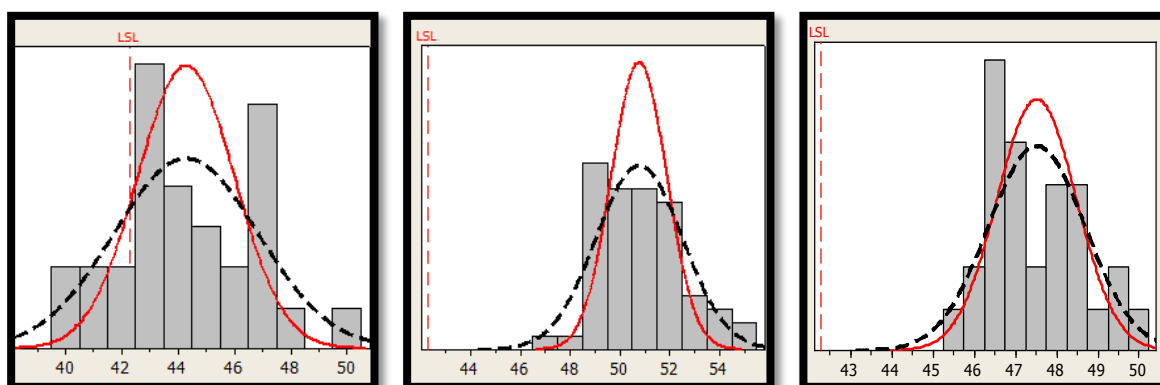


Figura 7 – Histograma de capacidade dos experimentos 1, 2 e 3 respectivamente.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.


Tabela 5 - Resultados dos experimentos.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Nível σ (capabilidade)	2,73	6	6
Probabilidade de não atendimento (PNA)	21,83%	0%	0%
Custo do aço R\$/t	98,89	103,29	73,26

4 CONCLUSÃO

A iniciativa de utilizar um modelamento matemático que utilizasse parâmetros de processo e composição química do aço para prever as propriedades mecânicas de perfis ASTM A572 G60 foi um projeto pioneiro na unidade da Votorantim Siderurgia de Barra Mansa. As análises realizadas foram apropriadas ao objetivo do trabalho. Após a realização de todos os experimentos e análises dos resultados, o processo mostrou-se estável em relação ao resultado das propriedades mecânicas do material com 100% de atendimento a especificação da norma.

A redução do custo da liga foi de 17% o que proporcional um ganho anual na ordem de R\$450.00,00

É importante destacar como um ganho relevante à satisfação do cliente e o aumento no número de vendas em 30% nestes perfis.

Agradecimentos

A equipe do projeto agradece a Votorantim Siderurgia, gerência de produtos e processos e a gerência de laminação a quente da unidade de Barra Mansa pelo apoio e incentivo aos experimentos realizados.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM A572 Grade 50 and 60 - Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. American Society for Testing and Materials, 2007.
- 2 Bai DQ, et al. Effect of Deformation Parameters on the No- Recrystallization Temperature in Nb-Bearing Steels. Metallurgical Transactions A, 1993: 2151-2159.
- 3 Gorni AA, Cavalcanti CG. Modelamento Matemático das Temperaturas Críticas da Laminação Controlada através de Equações Empíricase Redes Neurais. LIII Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte MG, 13 a 17 de Setembro de 1998.
- 4 Schiavo CP, Gonzalez BM, Santos AA, Marra KM. Influência dos Parâmetros de Solubilização Temperatura e Tempo de Encharque na Temperatura e Tempo de Encharque na T_{NR} de um Aço Microligado Ao Nb, V, E Ti. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, 2011; 8(1): 14-18.
- 5 Malarda B, Remyb B, Scottb C, Deschamps A, Chêne J, Dieudonné T et al. Hydrogen trapping by VC precipitates and structural defects in a high strength Fe–Mn–C steel studied by small-angle neutron scattering. Materials Science and Engineering A, 2012; 536: 110-116.
- 6 Campos MS. Desvendando o Minitab. Editora Qualitymark, 262, 2004.
- 7 Kiemele MJ, Schmidt SR. Basic Statistics - Tools for Continuous Improvement. Air Academy Pr; 4th edition June 1997.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.