

UMA ABORDAGEM SEIS SIGMA PARA OTIMIZAR A CAPABILIDADE DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO

ANDERSON PAULO DE PAIVA¹
PAULO ROBERTO MAIA²
ROGÉRIO SANTANA PERUCHI³
SEBASTIÃO CARLOS DA COSTA⁴
TARCÍSIO GONÇALVES DE BRITO⁵

RESUMO

Este artigo pretende aplicar um roadmap Seis Sigma para otimizar o sistema de medição (SM) de um processo de soldagem para revestimento. A principal contribuição desta pesquisa envolve a aplicação de uma metodologia estruturada (DMAIC – Definir, Medir, Analisar, Melhorar (Improve), Controlar) capaz de identificar, analisar e reduzir a variação do SM através de análise estatística univariada e multivariada. A fase definir apresenta o problema do processo que, neste caso, trata da soldagem de revestimento do aço carbono ABNT 1020 usando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L. Na fase medir foi determinado a capacidade inicial do software analisador de imagens através de análise de componentes principais e estudos de repetitividade e reprodutividade. Após identificar a capacidade do SM através de índices de avaliação do SM, análise de variância e análises gráficas foram executadas para identificar as causas específicas de variação no decorrer da fase analisar do projeto Seis Sigma. Na fase melhorar, planejamento e implementação de ajustes ao processo de medição foram aplicados com objetivo de melhorar a precisão e exatidão do SM. Ajustes ao procedimento de medição e sistemas de controle durante a fase controlar do projeto foram propostos para sustentar as melhorias do processo de medição.

¹ Professor, Orientador de Doutorado, Pesquisador 2 -CNPq, Supervisor de Pós-Doutorado em Engenharia de Produção na UNIFEI;

² Aluno de Doutorado pela UNIFEI e Professor na UNIVAS;

³ Aluno de Pós-Doutorado pela UNIFEI;

⁴ Professor, Orientador de Doutorado, Pesquisador 2 -CNPq pela UNIFEI;

⁵ Aluno de Doutorado pela UNIFEI e Professor na FAEX.

Palavras-chave: Seis Sigmas, DMAIC, Análise de Componentes Principais, Repetitividade e Reprodutividade, Soldagem.

ABSTRACT

This article aims to apply a roadmap Six Sigma to optimize the measurement system (SM) of a welding process coating. The main contribution of this research involves the application of a structured methodology (DMAIC - Define, Measure, Analyze, Improve (Improve), Check) able to identify, analyze and reduce the variation of the SM using univariate and multivariate statistical analysis. The phase define process presents the problem that, in this case, welding of the coating the carbon steel 1020 ABNT using tubular wires stainless steel ABNT 316L. In phase measure was determined the initial capability of the image analyzer software through principal component analysis and studies of repeatability and reproducibility. After identifying the capability of the SM through SM evaluation indexes, analysis of variance and graphic analyzes were performed to identify the specific causes of variation during the analysis phase of the Six Sigma project. In improve phase, planning and implementation of the measurement process adjustments were applied in order to improve the precision and accuracy of SM. Adjustments to the procedure of measuring and control system for phase of the project control have been proposed to sustain the measurement process improvements.

Key words: Six Sigma, DMAIC, principal component analysis, repeatability and reproducibility, welding.

1 INTRODUÇÃO

Em qualquer pesquisa que usa o método experimental para atingir a objetivos pré-estabelecidos, recomenda-se analisar a variabilidade do processo de medição. Esta etapa é importante para o pesquisador poder afirmar com maior convicção se os resultados obtidos no estudo, realmente são efeitos das alterações dos níveis dos fatores do experimento ou são apenas variações do sistema de medição (SM). Particularmente, em projetos de melhoria da qualidade, como o Seis Sigma, antes de analisar a capacidade do processo deve-se avaliar a capacidade do SM. Uma estratégia bastante difundida para selecionar a característica mais crítica é através da priorização de uma variável dentre várias possíveis. Esta característica é uma variável de resposta que tem uma importância crítica para o cliente, logo, as futuras ações de melhoria devem ser tomadas com objetivo de otimizar esta característica da qualidade. No caso em que se deseja avaliar um SM que mede múltiplas variáveis, a estratégia de priorização da característica da qualidade e utilização de métodos univariados pode não ser satisfatória. Nestes casos, as características geralmente apresentam uma estrutura de correlação que deve ser considerada na análise, logo, devem ser utilizados métodos multivariados para análise deste SM (Peruchi et al., 2013).

Dejaegher et al. (2010) usaram a metodologia Seis Sigma para medir, analisar e melhorar a capacidade de um método requerido para testar e confirmar a qualidade de um ingrediente ativo farmacêutico. Isto foi feito usando múltiplos estudos GR&R para analisar a capacidade do método de medição e em seguida foi utilizado planejamento de experimentos para melhorar este método. Johnson et al. (2006) apresentaram uma aplicação do DMAIC para o experimento “paper helicopter”, disponível em Box (1992). Na etapa Medir, daquele projeto Seis Sigma para Black Belts, os autores usaram um estudo GR&R, através do método ANOVA, para avaliar o sistema que mede o tempo de descida dos helicópteros de papel. A componente de variação devido ao SM foi de apenas 2,24%, logo, os autores concluíram que o SM era aceitável para a condução do projeto.

Kaija et al. (2010) usaram algumas ferramentas Seis Sigma para avaliar um processo de impressão de uma camada dielétrica com uma impressora de jato de tinta. Inicialmente foi conduzido um estudo GR&R para avaliar qual a proporção de variação é causada pelo SM e pela variação do processo. Em seguida, planejamento e análise de experimentos foram conduzidos para identificar os parâmetros com os efeitos mais significativos para as respostas camada isolante e rugosidade da camada dielétrica. Li e Al-Refaie (2008) utilizaram o método DMAIC do Seis Sigma para aumentar a capacidade do SM de uma indústria madeireira. O SM avaliado por um estudo GR&R foi considerado inaceitável. Para melhorar o SM foi implementado treinamento dos operadores, seleção adequada do dispositivo de medição e o método de medição foi também melhorado. Em um segundo estudo GR&R, os autores concluíram que a variância do dispositivo de medição foi reduzida em 39.38% e o índice ndc foi melhorado com um aumento de 168.84%.

O objetivo desta pesquisa é aplicar uma abordagem Seis Sigma multivariada para otimizar o SM de um processo de soldagem para revestimento. O processo envolvido trata-se da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L. Os parâmetros geométricos do cordão de solda R (reforço), P (penetração), L (largura), AR (área de reforço), AP (área de penetração) e AT (área total) foram medidos através do software analisador de imagens, Analysis Doc®. Análise de componentes principais com estudos de repetitividade e reprodutividade foram as técnicas estatísticas selecionadas para avaliar o SM multivariado. O roadmap DMAIC foi o método utilizado para direcionar o analista no processo de redução da variação devido ao SM. Os resultados desta pesquisa mostraram que o treinamento dos operadores foi eficiente ao reduzir em 50% a variação do estudo GR&R devido ao SM.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SEIS SIGMA

Bill Smith, um engenheiro da Motorola, desenvolveu o programa Seis Sigma como uma forma de atender as necessidades de melhoria da qualidade e redução

de defeitos em seus produtos. Bob Galvin, CEO da Motorola, ficou impressionado com os resultados de sucesso desta metodologia e decidiu aplicar o Seis Sigma com foco nos processos de manufatura. Entre 1987 e 1994 foi alcançada uma redução de 94% dos defeitos em semicondutores (Montgomery e Woodall, 2008). Empresas como a Allied Signal, IBM e General Electric adotaram o Seis Sigma como requisito corporativo para as operações estratégicas e táticas para produzir resultados de alto nível, melhorar processos de trabalho, ampliar as competências dos trabalhadores e promover mudança cultural (Aboelmaged, 2010).

Linderman et al. (2003) trataram da necessidade de uma definição comum para Seis Sigma. Os autores propuseram que Seis Sigma é um método organizado e sistemático para a melhoria do processo estratégico e desenvolvimento de novos produtos e serviços que se baseia em métodos estatísticos e científicos para fazer reduções drásticas nas taxas de defeitos definidos pelo cliente. Adicionalmente a esta definição, Brady e Allen (2006), destacaram dois princípios, retorno financeiro dos projetos e formação de não estatísticos no uso profissional das ferramentas com um mínimo de teoria.

O Seis Sigma utiliza uma variedade de especialistas em melhoria para alcançar suas metas, frequentemente referidos como Black Belts (BBs), Master Black Belts (MBBs), Green Belts (GBs) e Champions. BBs trabalham full-time na condução de projetos de melhoria e geralmente recebem 4 semanas de treinamento. MBBs recebem mais treinamento e muitas vezes servem como instrutores e consultores internos. GBs trabalham part-time, recebem menos treinamento (2 semanas) e auxiliam os BBs nos projetos de melhoria. Finalmente, o Champion é quem identifica os projetos estrategicamente importantes para as equipes de melhoria e fornecem recursos para a condução do projeto. O Champion recebe apenas uma orientação sobre Seis Sigma ao invés de um treinamento detalhado. Como pode ser visto, a intensidade e o treinamento diferenciado é uma parte importante da abordagem Seis Sigma (Aboelmaged, 2010; Linderman et al., 2003; Schroeder et al., 2008).

De acordo com Montgomery e Woodall (2008), os projetos Seis Sigma, geralmente, têm duração de 4-6 meses e são selecionados de acordo com o potencial impacto nos negócios. Melhoria da qualidade e do negócio via projetos

tiveram sua origem com Joseph Juran, que sempre estimulou a abordagem projeto-a-projeto para melhorar a qualidade (ver Juran, 1998). O impacto do projeto deve ser avaliado, pelo departamento financeiro da empresa, em termos de seus benefícios financeiros para o negócio. Obviamente, projetos com grandes potenciais de impacto são mais desejáveis. Esta integração dos sistemas financeiros é uma prática padrão do Seis Sigma e deve ser parte do projeto DMAIC.

Os trabalhos que têm usado o DMAIC apresentam algumas divergências de definições de alguns conceitos, estrutura das fases e dos passos do projeto, assim como as ferramentas utilizadas em cada fase. Alguns autores (De Koning e De Mast, 2006; De Mast, 2003; De Mast, 2004; De Mast et al., 2000) avaliaram a cientificidade dos principais roadmaps usados em Seis Sigma para projetos de melhoria. Os trabalhos destes autores resultaram no trabalho de De Koning e De Mast (2006), que consiste na reconstrução racional do *roadmap* Seis Sigma. Com base no estudo destes autores, neste artigo será adotado o *roadmap* genérico proposto no artigo de De Koning e De Mast (2006).

De Mast e Lokkerbol (2012) criticamente compararam o método *DMAIC*, em De Koning e De Mast (2006), com teorias científicas sobre solução de problemas. Um ponto forte destacado pelos autores acerca deste método compreende eficazes técnicas estatísticas para tomadas de decisões baseadas em fatos e verificação empírica de ideias, além de um roadmap bem elaborado para estruturar e resolver problemas. O problema desta pesquisa se enquadra adequadamente aos aspectos destacados por De Mast e Lokkerbol (2012), os quais determinam que o método *DMAIC* é aplicável para resolver problemas do tipo: (i) empíricos, sendo eles semiestruturado ou bem estruturado; (ii) problemas que requerem definição, diagnóstico e projeto de melhorias; (iii) apesar de ser genérico, o método *DMAIC* pode ser alterado para satisfazer mais adequadamente a solução de problemas de domínios mais específicos. Portanto, neste artigo, será adotada a estrutura de fases e parcialmente dos passos propostos em De Koning e De Mast (2012) para solução do problema desta pesquisa.

2.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Análise de componentes principais é uma das ferramentas aplicadas mais amplamente usadas para resumir os padrões comuns de variação entre variáveis. É algebricamente uma combinação linear ℓ de q variáveis aleatórias $CTQ_1, CTQ_2, \dots, CTQ_q$. Geometricamente essas combinações representam um novo sistema de coordenadas obtidas durante a rotação de um sistema original (Johnson e Wichern, 2007; Rencher, 2002; Paiva et al., 2009; Mukherjee e Ray, 2008). As coordenadas dos eixos têm agora as variáveis $CTQ_1, CTQ_2, \dots, CTQ_q$ e representam a direção de máximo. As componentes principais são não correlacionadas e dependem somente da matriz de covariância Σ (ou da matriz de correlação ρ) das variáveis $CTQ_1, CTQ_2, \dots, CTQ_q$ e seu desenvolvimento não requer a suposição de normalidade multivariada.

As informações necessárias para obtenção dos escores do primeiro componente principal (PC1), segundo a definição de Johnson e Wichern (2007), vem da combinação linear que maximizar a variância, de acordo com a Eq. (1).

$$\begin{aligned} \text{Maximizar : } & \text{Var}[\mathbf{e}'_1 \mathbf{CTQ}] \\ \text{Subjeito a : } & \mathbf{e}'_1 \mathbf{e}_1 = 1 \end{aligned} \tag{1}$$

No problema de otimização acima, o produto das variáveis de decisão são limitadas ao comprimento unitário, para eliminar indeterminação da solução, visto que \mathbf{e}_1 pode ser multiplicado por qualquer escalar. Para obter os escores do segundo componente principal (PC2), o problema (1) é alterado, de acordo com a Eq. (2), para garantir a ortogonalidade entre PC1 e PC2.

$$\begin{aligned} \text{Maximizar : } & \text{Var}[\mathbf{e}'_2 \mathbf{CTQ}] \\ \text{Subjeito a : } & \mathbf{e}'_2 \mathbf{e}_2 = 1 \\ & \text{Cov}[\mathbf{e}'_1 \mathbf{CTQ}, \mathbf{e}'_2 \mathbf{CTQ}] = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Desta forma geral, o i -ésimo componente principal será a solução para a combinação linear $\mathbf{e}'_i \mathbf{CTQ}$ que maximiza:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximizar : } & \text{Var}[\mathbf{e}'_i \mathbf{CTQ}] \\
 \text{Subjeito a : } & \mathbf{e}'_i \mathbf{e}_i = 1 \\
 & \text{Cov}[\mathbf{e}'_i \mathbf{CTQ}, \mathbf{e}'_k \mathbf{CTQ}] = 0 \quad \text{para } k < i
 \end{aligned} \tag{3}$$

O resultado do problema de otimização lexicográfica descrito acima determina como solução da função objetivo os autovalores e, a solução ótima das variáveis de decisão, os autovetores de cada componente principal. De posse dos pares de autovalores e autovetores de cada componente principal, $(\lambda_1, \mathbf{e}_1), (\lambda_2, \mathbf{e}_2), \dots, (\lambda_q, \mathbf{e}_q)$ onde $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_q \geq 0$, os escores de componentes principais podem ser calculados através da combinação linear abaixo

$$\text{PC}_i = \mathbf{e}'_i \mathbf{CTQ} = \mathbf{e}_{1i} \mathbf{CTQ}_1 + \mathbf{e}_{2i} \mathbf{CTQ}_2 + \dots + \mathbf{e}_{qi} \mathbf{CTQ}_q \quad i = 1, 2, \dots, q \tag{4}$$

assim como, o percentual de explicação da i-ésima componente principal usando

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^q \lambda_j} \quad i = 1, 2, \dots, q \tag{5}$$

2.3 ANÁLISE DE SISTEMA DE MEDIÇÃO BASEADO EM PCA

Wang e Chien (2010) compararam o método PCA com mais dois outros métodos para a análise do sistema de medição (SM). No entanto, estes autores realizaram a análise individualmente para cada componente principal. Esta metodologia pode não ser adequada, pois a análise individual de cada uma das componentes pode proporcionar interpretações distintas. Quando as respostas apresentam correlações muito altas (%PC1 > 95%, por exemplo), a análise da primeira componente principal explica razoavelmente bem a variabilidade do SM. No entanto, quando as correlações entre as respostas não são muito altas, há a necessidade de analisar mais de uma componente principal, pois apenas a primeira componente principal não é capaz de explicar todo o conjunto de dados. Assim, neste artigo será adotado um novo método de estudo GR&R multivariado, proposto por Peruchi et al. (2013), que usa ponderação das componentes principais. Neste

caso, o modelo tem como resposta as componentes principais ponderadas através de seus respectivos autovalores e é dado por:

$$WPC = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \forall i = 1, 2, \dots, p \quad j = 1, 2, \dots, o \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (6)$$

onde:

$$WPC = \sum_{i=1}^q \lambda_i [(PC_i)] = \lambda_1 PC_1 + \lambda_2 PC_2 + \dots + \lambda_q PC_q \quad (7)$$

a resposta usada no modelo (6) é o resultado de uma ponderação das componentes principais por seus respectivos autovalores, de acordo com a Eq. (7). A variável μ é uma constante e α_i , β_j , $(\alpha\beta)_{ij}$, são variáveis aleatórias normais independentes com média zero e variância σ_α^2 , σ_β^2 , $\sigma_{(\alpha\beta)}^2$ e σ_ε^2 , respectivamente.

Em Johnson e Wichern (2007), verifica-se que há uma variedade de regras para estimar o número adequado de eixos de componentes principais não triviais que podem ser adotadas para representar o conjunto de dados. No entanto, devido à ponderação das componentes principais por seus respectivos autovalores, todas as componentes principais podem ser incluídas no modelo. As componentes com maior autovalor terão maior importância no modelo ponderado e, apesar disso, nenhuma informação deixará de ser incluída no estudo.

As componentes de variância do modelo (6) podem ser estimadas usando o método ANOVA (ver detalhes em Peruchi et al., 2013) e são traduzidos em notação GR&R tal como:

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= \sigma_\alpha^2, & \sigma_{repetitividade}^2 &= \sigma_\varepsilon^2, & \sigma_{reprodutividade}^2 &= \sigma_\beta^2 + \sigma_{\alpha\beta}^2 \\ \sigma_{sm}^2 &= \sigma_{repetitividade}^2 + \sigma_{reprodutividade}^2, & \sigma_t^2 &= \sigma_p^2 + \sigma_{sm}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Um índice comum em estudos GR&R usado para determinar a aceitação do SM recomenda dimensionar a variância do SM com a variância total do processo observado. A estatística, denominada porcentagem R&R, é definida como:

$$\% R \& R_{wpc} = \frac{\sigma_{sm}^2}{\sigma_t^2} \quad (9)$$

Se %R&Rwpc indicar que o SM é menor que 1% o SM é considerado aceitável. Se o valor do índice estiver em uma região marginal entre 1% e 9%, indica que o SM pode ser considerado aceitável dependendo da aplicação, custo do dispositivo de medição, custo de reparo ou outros fatores. Além disso, o SM é considerado inaceitável se o valor do índice exceder 9% e deverá ser melhorado.

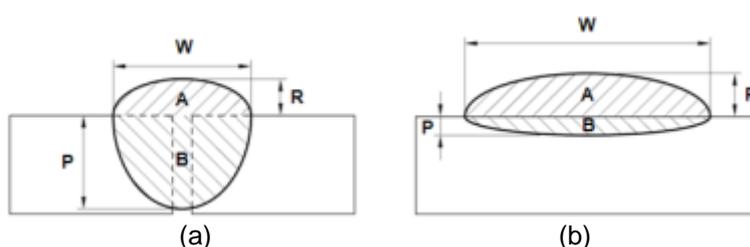
3. MÉTODO PROPOSTO

3.1 ETAPA DEFINIR

De acordo com De Koning e De Mast (2006), a etapa definir de um projeto Seis Sigma/DMAIC consiste basicamente em selecionar o problema a ser resolvido, avaliar seu impacto no consumidor e potenciais benefícios que o projeto pode proporcionar. A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem diz respeito à geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada (Figura 1a), na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R) e baixas penetrações (P) (Figura 1b). A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo. Assim, um dos maiores desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado dos parâmetros do processo para que o material depositado adquira a geometria desejada. O processo envolvido trata-se da

soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L. A importância de que os cordões de revestimento apresentem a geometria definida pela Figura 1 já vem sendo destacada por autores como Kannan e Murugan (2006a) e Shahi e Pandey (2006).

Figura 1. Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento de Gomes et al. (2013).



Fonte: Gomes et al (2013).

Quanto às propriedades dos revestimentos de aços inoxidáveis, as características desejadas do material depositado, segundo Kannan e Murugan (2006b), se resumem a uma resistência razoável, boa soldabilidade com o metal base e boas propriedades de resistência à corrosão geral e à corrosão localizada. Para Ferriere et al. (2006), os revestimentos de aços inoxidáveis sobre aços carbono se mostram como uma boa solução para os problemas de elaboração de materiais que combinem altos níveis de propriedades mecânicas com boa resistência à corrosão.

As características anteriores têm feito da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis uma operação de crescente aplicabilidade entre os mais diversos tipos de indústrias, como por exemplo, as indústrias petrolíferas, químicas, alimentícias, agrícolas, nucleares, navais, ferroviária, de construção civil, entre outras (Kannan e Murugan, 2006a; Murugan e Parmar, 1994).

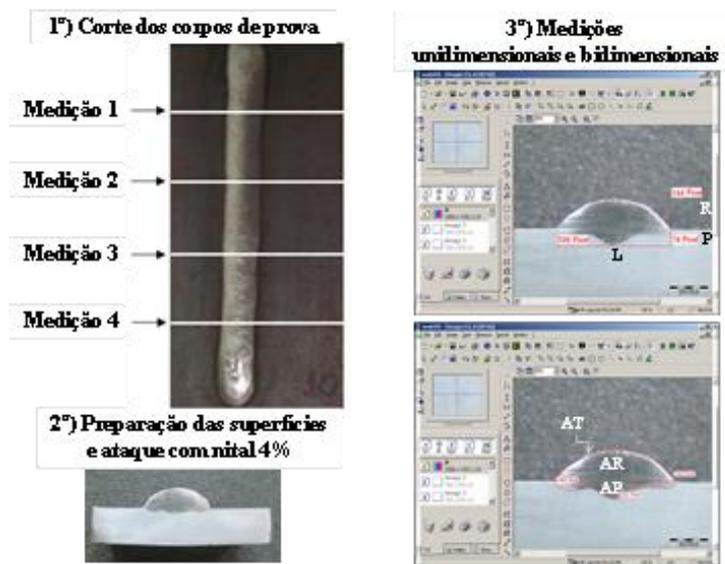
Gomes et al. (2010) revisou as principais pesquisas sobre as características da qualidade das operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis empregando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular. As características podem ser divididas em três categorias: características geométricas, respostas de

produtividade e propriedades finais dos revestimentos. As características geométricas envolvem penetração, reforço, largura do cordão e diluição; as respostas de produtividade são a taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento do processo; as propriedades do revestimento compreendem a dureza, composição química, microestrutura e resistência à corrosão.

3.2 ETAPA MEDIR

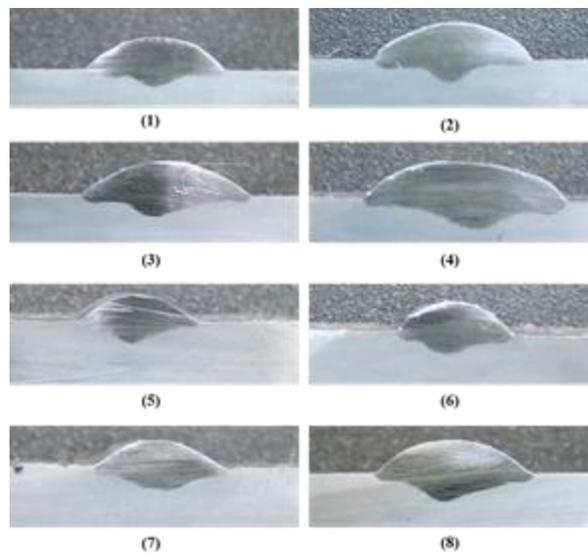
A etapa de medição tem objetivo de traduzir o problema para uma forma mensurável e, em seguida, medir a situação atual do processo (De Koning e De Mast, 2006). Foram avaliados seis parâmetros geométricos de um cordão de solda R (reforço), P (penetração), L (largura), AR (área de reforço), AP (área de penetração) e AT (área total). Os parâmetros geométricos do cordão de solda foram medidos através do software analisador de imagens Analysis Doc®. A Figura 2 descreve o procedimento utilizado para a medição da geometria do cordão de revestimento. Observa-se, nesta figura, que as medições foram realizadas em quatro pontos distintos dos cordões. Os corpos de prova foram cortados e suas seções transversais devidamente preparadas e atacadas com nital 4%. Em seguida, foram tiradas fotografias dos corpos de prova a partir de um mesmo ponto referencial, para evitar presença de erro sistemático. Para o estudo GR&R foram selecionados os corpos de prova obtidos pelas seções transversais denominadas “Medição 2”, de acordo com a Figura 2. Com o objetivo de selecionar uma quantidade de peças que representasse bem a amplitude de operação para as características em análise, a Figura 3 mostra as peças escolhidas para este estudo GR&R multivariado.

Figura 2. Procedimento para medição da geometria do cordão de solda
Gomes et al. (2013).



Fonte: Gomes et al (2013).

Figura 3. Cordões selecionados para o estudo GR&R multivariado Gomes et al. (2013).



Fonte: Gomes et al (2013).

A Figura 2 mostra o software Analysis Doc® realizando as medições unidimensionais e bidimensionais dos parâmetros geométricos do cordão de solda (1) da Figura 3. A unidade de medida fornecida pelo software é o pixel, logo, as

medições unidimensionais foram convertidas para mm usando a Eq. (10) e as medições bidimensionais foram convertidas em mm² usando a Eq. (11).

$$CTQ_{real} = \frac{CTQ_{observado} \times Espessura_{real}}{Espessura_{observado}} \quad (10)$$

$$CTQ_{real} = \frac{CTQ_{observado} \times Espessura_{real}^2}{Espessura_{observado}^2} \quad (11)$$

onde CTQ_{real} é o valor real em mm para cada CTQ; CTQ_{observado} é o valor observado em pixels para cada CTQ; Espessura_{real} é o valor real constante das espessuras das chapas de 6,35 mm e; Espessura_{observado} é o valor observado da espessura das chapas em pixels. Os valores reais para os parâmetros geométricos do cordão de solda do estudo GR&R multivariado estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Medições das CTQs para o estudo GR&R multivariado.

i	k	j=1						j=2						j=3					
		R	P	L	AP	AR	AT	R	P	L	AP	AR	AT	R	P	L	AP	AR	AT
1	1	2,5	1,5	11,0	7,7	20,8	28,7	2,7	1,5	11,4	8,5	22,5	30,2	2,7	1,5	11,3	8,4	20,8	29,0
1	2	2,6	1,5	11,2	8,1	20,5	29,0	2,7	1,4	11,4	8,4	22,2	29,9	2,7	1,5	11,4	8,6	21,8	30,1
1	3	2,7	1,5	11,4	8,1	21,7	30,1	2,7	1,4	11,8	8,7	23,5	31,1	2,7	1,4	11,3	8,2	21,5	29,6
2	1	3,0	1,9	12,6	10,0	27,9	38,0	3,1	1,9	13,0	10,8	29,7	39,9	3,2	1,9	13,0	10,5	29,2	39,2
2	2	3,0	1,8	12,7	10,5	28,4	38,9	3,2	1,8	13,0	9,9	30,1	39,4	3,2	1,8	13,0	10,8	29,1	39,4
2	3	3,1	1,9	13,0	11,3	28,9	40,4	3,3	1,8	13,2	10,5	30,9	40,5	3,3	1,8	13,1	10,6	29,7	39,5
3	1	2,5	1,6	12,4	10,5	20,9	30,3	2,6	1,5	12,8	9,8	23,0	32,3	2,5	1,6	12,5	9,8	21,1	30,6
3	2	2,5	1,5	12,6	10,1	21,6	31,5	2,6	1,6	12,7	9,8	22,6	31,9	2,5	1,5	12,5	9,8	21,4	30,7
3	3	2,6	1,6	12,9	10,6	22,6	32,6	2,5	1,6	12,7	10,2	22,4	31,8	2,6	1,5	12,6	9,9	21,4	31,1
4	1	2,6	2,2	14,5	15,5	26,3	42,2	2,8	2,2	15,0	17,5	31,3	47,9	3,0	2,1	15,2	16,6	32,4	48,7
4	2	2,6	2,1	14,8	16,2	28,5	44,2	2,9	2,0	15,0	15,4	32,8	47,2	3,0	2,1	15,2	15,8	33,3	48,6
4	3	2,8	2,1	15,4	16,1	31,3	47,3	3,0	2,2	15,4	16,5	34,7	50,1	3,0	2,1	15,1	15,4	33,4	48,4
5	1	1,9	1,6	8,8	7,1	11,9	18,5	2,1	1,5	9,3	7,6	13,1	20,2	2,1	1,6	9,2	7,7	12,6	19,7
5	2	2,1	1,5	8,9	6,7	12,5	19,2	2,0	1,6	9,2	7,8	12,4	20,0	2,1	1,6	9,2	7,5	12,7	19,9
5	3	2,1	1,6	9,3	7,5	12,6	20,5	2,0	1,6	9,2	8,0	12,7	20,4	2,1	1,6	9,2	7,2	12,7	19,7
6	1	2,7	1,7	9,8	9,9	18,0	27,9	2,8	1,6	10,2	9,6	20,4	29,8	2,8	1,7	10,1	9,9	19,1	28,7
6	2	2,8	1,6	9,9	9,4	19,7	28,9	3,0	1,6	10,4	9,3	21,9	31,1	2,8	1,7	10,1	10,0	19,1	28,5
6	3	2,8	1,8	10,2	10,1	19,4	29,2	2,9	1,7	10,2	9,5	20,1	29,5	2,8	1,7	10,2	10,2	19,3	29,2
7	1	2,0	1,5	9,5	8,4	12,8	21,3	2,0	1,4	9,6	8,3	13,6	21,4	2,0	1,5	9,5	8,7	12,5	20,8
7	2	1,9	1,6	9,3	8,6	12,1	20,6	2,1	1,4	9,8	7,9	14,0	21,8	2,1	1,5	9,7	8,5	13,0	21,1
7	3	2,1	1,5	9,5	8,5	13,2	21,4	2,0	1,5	9,6	8,7	13,0	21,3	2,1	1,5	9,7	8,5	12,8	21,0
8	1	2,3	2,0	11,3	11,6	18,3	29,9	2,5	2,0	11,6	11,5	20,4	31,3	2,4	2,0	11,4	11,9	18,6	30,5
8	2	2,5	2,0	11,6	11,9	19,9	31,8	2,5	2,0	11,6	11,9	20,1	31,4	2,5	2,0	11,5	11,9	19,1	30,5
8	3	2,4	2,0	11,5	12,0	19,3	31,7	2,5	2,0	11,6	12,0	19,6	31,0	2,4	2,0	11,5	12,1	18,7	30,8

Fonte: Próprio autor

A Tabela 2 apresenta a avaliação do sistema de medição (SM) segundo o método WPC. A Tabela 3 mostra que as correlações entre as CTQs são significativas e estas variáveis são medidas pelo mesmo instrumento de medição, caracterizando-se a necessidade de usar técnicas estatísticas multivariadas para avaliar este SM. O método WPC pode ser utilizado para resumir o comportamento das CTQs e proporcionar uma classificação geral para o SM. Inicialmente, foi feita a análise das componentes principais das respostas R, P, L, AR, AP e AT usando a matriz de correlação dos dados (Tabela 4). A resposta do modelo da Eq. (6) foi obtida pela ponderação das componentes principais usando a Eq. (7):

$$WPC = \sum_{i=1}^6 [\lambda_i (PC_i)] = 4,868PC_1 + 0,799PC_2 + 0,271PC_3 + 0,047PC_4 + 0,015PC_5 + 0,001PC_6 \quad (12)$$

Tabela 2 - Classificação do sistema de medição usando o método WPC.

Fonte	Variância	%Contribuição
GR&R	1.446	1.11
Repetitividade	0.973	0.75
Reprodutividade	0.473	0.36
Operador	0.260	0.20
Peça*Operador	0.214	0.16
Peça	129.044	98.89
Varição Total	130.490	100.00

Fonte: Próprio autor

Os resultados da Eq. (12) foram ajustados para uma análise de variância two-way, de acordo com a Eq. (6). O vetor WPC representa o conjunto original das respostas R, P, L, AR, AP e AT. Usando os resultados da Eq. (8) foram estimadas as variâncias para processo (peça-a-peça), repetitividade, reprodutividade, SM e variação total. Em seguida, as variâncias e, com a Eq. (9), o índice %R&Rwpc é mostrado na Tabela 2. O método WPC classifica o SM como marginal, %R&Rwpc=1,11%. Um SM classificado como marginal pode ser considerado aceitável dependendo da aplicação, no entanto, ainda há um potencial de melhoria que deve ser analisado. Logo, o objetivo deste projeto envolve a redução da variação devida ao SM a nível inferior a 1%.

Tabela 3 - Estrutura de correlação entre as CTQs.

	R	P	L	AP	AR
P	0,435* 0,000**				
L	0,691 0,000	0,645 0,000			
AP	0,488 0,000	0,884 0,000	0,842 0,000		
AR	0,888 0,000	0,607 0,000	0,930 0,000	0,743 0,000	
AT	0,817 0,000	0,732 0,000	0,955 0,000	0,864 0,000	0,978 0,000

Fonte: Próprio autor

Nota: *Correlação de Pearson

**P-value

Tabela 4 - Análise de componentes principais para as CTQs.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Autovalor	4,868	0,799	0,271	0,047	0,015	0,001
Proporção	0,811	0,133	0,045	0,008	0,002	0,000
Cumulativo	0,811	0,944	0,990	0,997	1,000	1,000
Variável	Autovetores					
R	0,363	-0,584	-0,547	-0,273	0,393	-0,003
P	0,358	0,592	-0,561	0,447	0,079	-0,021
L	0,429	-0,046	0,586	0,346	0,592	-0,007
AP	0,405	0,459	0,162	-0,742	0,014	-0,219
AR	0,434	-0,300	0,088	0,233	-0,567	-0,582
AT	0,451	-0,081	0,099	-0,021	-0,409	0,783

Fonte: Próprio autor

3.3 ETAPA ANALISAR

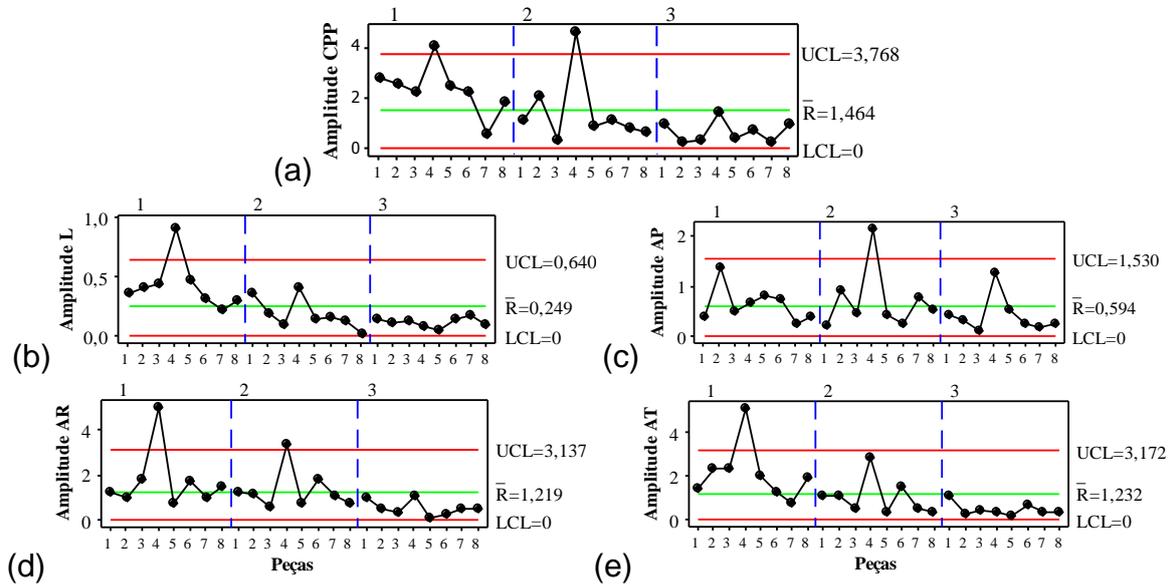
Para De Koning e De Mast (2006), a etapa analisar identifica os fatores de influência e causas que determinam o comportamento dos CTQs. Uma abordagem que consiste em análise de variância e análise gráfica foi utilizada para identificar as causas específicas de variação do SM. As cartas de controle da amplitude das medições dos operadores em cada peça mostra a presença de erro sistemático durante o procedimento de medição. A análise de variância identifica as fontes significativas de variação. Já a análise gráfica dos efeitos principais identifica a diferença estatisticamente significativa para a média das medições dos operadores. Por fim, a análise gráfica das interações mostra com mais detalhes as causas específicas de variação das medições dos operadores em cada peça.

A Figura 4 apresenta cartas de controle para a amplitude das medições observadas de cada operador para as CTQs. A análise da amplitude das medições dos operadores usando o método WPC é observada na Figura 4a. O operador 3 foi o especialista responsável pelo treinamento dos outros operadores para o procedimento de medição dos parâmetros geométricos do cordão de solda. O gráfico da Figura 4a evidencia que a variação das medições do operador 3 foi menor em relação aos outros operadores. Logo, as medições do operador 3 foram tratadas como referência. Padrões similares a Figura 4a foram observados em Figura. 4b-4e, sugerindo que medições da peça 4 realizada pelo operador 1 de L, AR e AT, assim como, pelo operador 2 de AP e AR devem ser refeitas.

Para esta aplicação, usando o método WPC, a diferença entre a média das medições obtidas pelos operadores foi significativa, como observado na Tabela 5. Visto que o efeito combinado de diferentes interações “peça*operador”, observado para as variáveis originais, pode determinar o efeito de diferença entre a média das medições dos “operadores” no vetor WPC, além do efeito “operador”, será também observado o efeito “peça*operador” nas variáveis originais. A Tabela 5 apresenta um resumo da análise de variância para as CTQs. Para AP apenas o fator peça foi significativo. Enquanto que para P e L os fatores peça e operador foram significativos. Já R, AR e AT, além dos fatores peça e operador, o termo de interação também foi significativo.

A análise de variância de WPC apresentou diferença significativa das medições dos operadores. Adicionalmente, o gráfico de efeitos principais da Figura 5a determina que a média das medições obtidas pelo operador 1 foi menor que dos operadores 2 e 3. Com base nesta informação, os gráficos das Figuras (5b-5f) e (6a-6c) foram investigados para os CTQs do projeto. Observa-se nas Figuras (5b) e (5d-5f) o mesmo que foi observado na Figura (5a), ou seja, a média das medições obtidas pelo operador 1 foi menor que dos operadores 2 e 3. Uma análise um pouco mais detalhada, através da Figura 6, mostra que a média das medições da peça 4 para as CTQs R, AR e AT realizadas pelo operador 1 foi menor em relação a média das mesmas medições para os operadores 2 e 3.

Figura 4 - Cartas de controle para a amplitude das medições dos operadores em cada peça



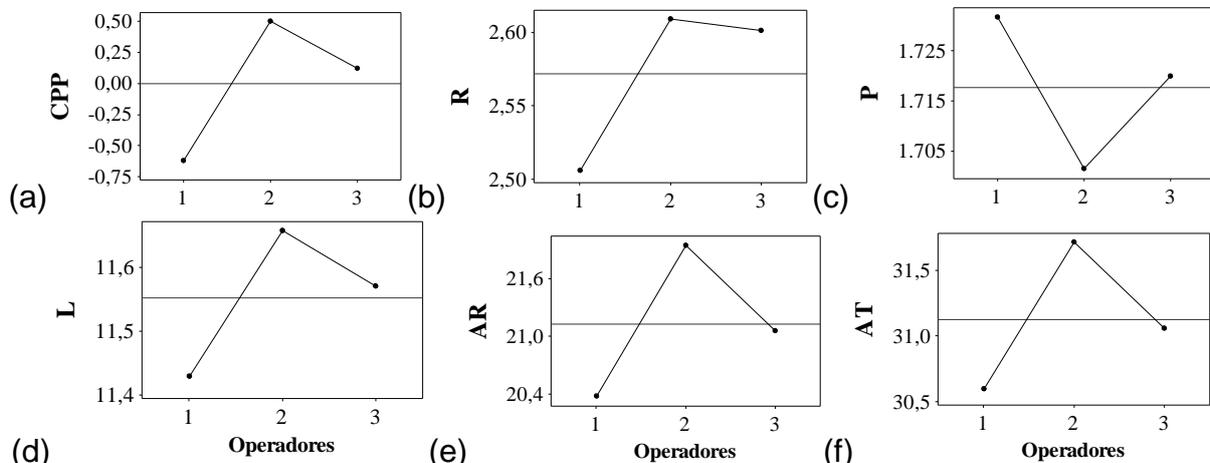
Fonte: Próprio autor

Tabela 5 - Análise de variância para os escores ponderados das PCs e para as CTQs.

Fonte	Multivariado	Univariado					
	WPC	R	P	L	AP	AR	AT
Peça	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Operador	0,025	0,002	0,042	0,000	0,820	0,007	0,042
Peça*Operador	0,097	0,041	-	-	0,140	0,001	0,007

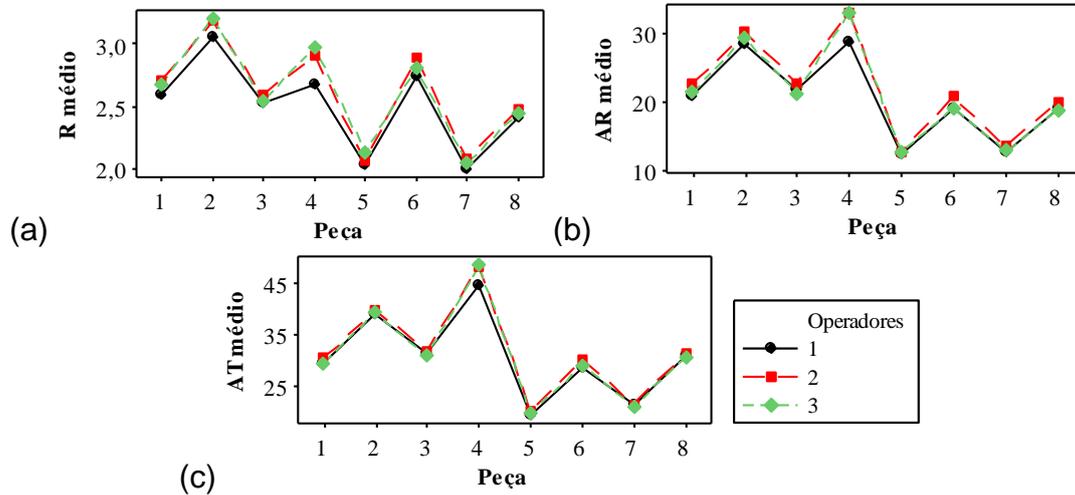
Fonte: Próprio autor

Figura 5 - Efeitos principais das médias das medições dos operadores



Fonte: Próprio autor

Figura 6 - Gráfico das interações entre as médias das medições dos operadores em cada peça



Fonte: Próprio autor

2.4 ETAPA MELHORAR

Na etapa de melhoria o objetivo é definir e implementar ajustes ao processo para melhorar o desempenho dos CTQs (De Koning e De Mast, 2006). A etapa analisar utilizou análise gráfica e de variância para identificar as causas de variação do SM. De acordo com os gráficos das Figuras (4a)-(4e), variação devido à causa especial deverá ser removida em:

Medições de L, AR e AT pelo operador 1 para a peça 4 (identificar qual das três réplicas é o outlier);

Medições de AP e AR pelo operador 2 para a peça 4 (identificar qual das três réplicas é o outlier).

O procedimento para identificar os outliers responsáveis pela variação especial deste SM consiste nos seguintes passos:

Ajustar o mesmo conjunto de dados para um arranjo fatorial completo geral de dois fatores com oito (peças) e três (operadores) níveis;

Estimar resíduos padronizados para as combinações de fatores que determinaram os outliers observados na etapa analisar;

Refazer medições nas quais os módulos dos resíduos padronizados são maiores que 2;

A análise de variância na Tabela 5 e os gráficos das Figuras. (5b-5f) e (6a-6c) determinam remover causa comum de variação para:

Medições de R, AR e AP pelo operador 1 para a peça 4 (refazer medição das três réplicas);

Com base na análise de causa comum e especial de variação descrita acima, os operadores 2 e, principalmente, 1 foram treinados e algumas medições foram executadas novamente. Os resultados dos cálculos de resíduos padronizados foram obtidos de acordo com o procedimento descrito acima e as novas leituras estão apresentadas na Tabela 6. Uma nova análise multivariada do SM foi realizada e os resultados são demonstrados na próxima seção deste artigo.

Tabela 6 - Resíduos padronizados e novas leituras para as CTQs com problemas de medição.

Peça	Operador	Resíduos padronizados				Novas leituras				
		L	AP	AR	AT	R	L	AP	AR	AT
4	1	-3,16548	-1,31026	-3,65582	-3,4333	2,95	14,91	15,52	32,70	48,60
4	1	-0,5207	0,867521	-0,26489	-0,53285	2,91		16,20	32,52	
4	1	3,686181	0,442738	3,920708	3,966147	3,07	14,92	16,07	32,72	48,61
4	2	-1,0395	3,397524	-2,44304	-0,73086			16,47	31,32	
4	2	-1,0395	-3,54778	-0,20607	-1,66936			16,46		
4	2	2,078998	0,150258	2,649117	2,400218				32,93	

Fonte: Próprio autor

2.5 ETAPA CONTROLAR

Finalmente, a etapa controlar ajusta o gerenciamento do processo e sistema de controle para que as melhorias alcançadas sejam mantidas [22]. Nesta etapa do projeto, destaca-se o resultado otimizado do SM que pode ser observado na Tabela 7. Com as alterações propostas na fase de melhoria do projeto, foi observado redução da variação devido ao SM em 50% (de %R&Rwpc=1,11% para %R&Rwpc=0,55%). A variação devido a repetitividade foi reduzida de 0,75% para 0,49%, enquanto que a reprodutividade foi reduzida de 0,36% para 0,06%. Logo, o treinamento dos operadores mostrou ser efetivo devido à redução significativa da variação das medições, principalmente, entre operadores e entre peças*operadores (reprodutividade). O procedimento de medição foi padronizado e documentado para realização de futuras medições em novos projetos.

Tabela 7 - Comparação da capacidade do sistema de medição antes e depois da otimização.

Fonte	Antes		Depois	
	Variância	%Contribuição	Variância	%Contribuição
GR&R	1.446	1.11	0,758	0,55
Repetitividade	0.973	0.75	0,675	0,49
Reprodutividade	0.473	0.36	0,083	0,06
Operador	0.260	0.20	0,083	0,06
Peça*Operador	0.214	0.16	-	-
Peça	129.044	98.89	136,201	99,45
Variação Total	130.490	100.00	136,958	100,00

Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÃO

Este artigo aplicou uma abordagem Seis Sigma para otimizar um sistema de medição (SM) multivariado de um processo de soldagem de revestimento. Análise de componentes principais, estudos GR&R com análises de variância e gráfica foram as ferramentas utilizadas em um roadmap DMAIC para reduzir a variação do SM. A fase definir apresentou o processo de soldagem de revestimento do aço carbono ABNT 1020 usando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L e as características da qualidade crítica para o processo. O principal resultado da fase medir foi a classificação do SM, neste caso, marginal com %R&Rwpc=1,11%. A fase analisar mostrou como extrair informações específicas e significativas de causas especiais e comuns de variação do estudo. As discussões geradas pela fase analisar foram adotadas para gerar o plano de ação da fase melhorar do projeto e direcionar o analista para quais medições deveriam ser refeitas. A fase de controle comparou o procedimento de medição antes e após o treinamento dos operadores. O projeto mostrou ser eficiente com a redução significativa de 50% de variação do estudo devido ao SM.

6 REREFÊNCIAS

R.S. Peruchi, P.P. Balestrassi, A.P. Paiva, J.R. Ferreira, M.S. Carmelossi, “New multivariate Gage R&R method for correlated characteristics”, **International Journal of Production Economics**, 144:301-315, 2013.

B. Dejaegher, M. Jimidar, M. De Smet, P. Cockaerts, J. Smeyers-Verbeke, Y. Vander Heyden, “Improving method capability of a drug substance HPLC assay”, **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, 42:155–170, 2006.

J.A. Johnson, S. Widener, H. Gitlow, E.A. Popovich, “Six Sigma Black Belt Case Study: G.E.P. Box’s Paper Helicopter Experiment”, **Quality Engineering**, 18:413-430, 2006.

G.E.P. Box, “Teaching engineers experimental design with a paper helicopter”, **Quality Engineering**, 4:453–459, 1992.

K. Kaija, V. Pekkanen, M. Mäntysalo, S. Koskinen, J. Niittynen, E. Halonen, P. Mansikkamäki, “P. Inkjetting dielectric layer for electronic applications”, **Microelectronic Engineering**, 87:1984–1991, 2010.

M.H.C. Li, A. Al-Refaie, “A. Improving wooden parts’ quality by adopting DMAIC procedure”, **Quality and Reliability Engineering International**, 24:351-360, 2008.
R.A. Johnson, D. Wichern, “**Applied Multivariate Statistical Analysis**”, 6 ed. Prentice-Hall, New Jersey, 2007.

A.C. Rencher, “**Methods of multivariate analysis**”, 2 ed. John Wiley & Sons, New York, 2002.

A.P. Paiva, E.J. Paiva, J.R. Ferreira, P.P. Balestrassi, S.C. Costa, “A multivariate mean square error optimization of AISI hardened steel turning”, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 43:631-643, 2008.

I. Mukherjee, P.K. Ray, “A systematic solution methodology for inferential multivariate modeling of industrial grinding process”, **Journal of Materials Processing Technology**, 196:379-392, 2008.

F.K. Wang, T.W. Chien, “Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study”, **Computers and Industrial Engineering**, 58:143-150, 2010.

D.C. Montgomery, W.H. Woodall, “An Overview of Six Sigma”, **International Statistical Review**, 76:329-346, 2008.

M.G. Aboelmaged, “Six Sigma quality: a structured review and implications for future research”, **International Journal of Quality & Reliability Management**, 27:268-317, 2010.

K. Linderman, R. Schroeder, S. Zaheer, A. Choo, “Six sigma: a goal theoretic perspective”, **Journal of Operations Management**, 21:193–203, 2003.

J.E. Brady, T.T. Allen, “Six Sigma Literature: A Review and Agenda for Future Research”, **Quality & Reliability Engineering International**, 22:335-367, 2006.

R.G. Schroeder, K. Linderman, C. Liedtke, A.S. Choo, “Six Sigma: Definition and underlying theory”, **Journal of Operations Management**, 26:536–554, 2008.

J.M. Juran, “**Juran on Planning for Quality**”, New York: Free Press, 1988.

H. De Koning, J. De Mast, “Grounding of Six-Sigma’s breakthrough cookbook: how to research a methodology?”, **International Journal of Six-Sigma and Competitive Advantage**, 1:263-275, 2005.

J. De Mast, “Quality improvement from the viewpoint of statistical method”, **Quality and Reliability Engineering International**, 19:255-64, 2003.

J. De Mast, “A methodological comparison of three strategies for quality improvement”, **International Journal of Quality & Reliability Management**, 21:198-213, 2004.

J. De Mast, W.A.J. Schippers, R.J.M.M. Does, E.R. Van Den Heuvel, “Steps and strategies in process improvement”, **Quality and Reliability Engineering International**, 16:301–311, 2000.

H. De Koning, J. De Mast, “A rational reconstruction of six-sigma’s breakthrough cookbook”, **International Journal of Quality and Reliability Management**, 23:766-787, 2006.

J. De Mast, J. Lokkerbol, “An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving”, **International Journal of Production Economics**, 139:604-614, 2012.

J.H.F. Gomes, A.P. Paiva, S.C. Costa, P.P. Balestrassi, E.J. Paiva, “Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings”, **European Journal of Operational Research**, 226:522–535, 2013.

T. Kannan, N. Murugan, “Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality”, **Journal of Materials Processing Technology**, 176:230-239, 2006.

A.S. Shahi, S. Pandey, “Prediction of dilution in GMA and UGMA stainless steel single layer cladding using response surface methodology”, **Science and Technology of Welding and Joining**, 11:634-640, 2006.

Kannan, N. Murugan, “Prediction of ferrite number of duplex stainless steel clad metals using RSM”, **Welding Journal**, 85:91-100, 2006.

A. Ferriere, C.S. Bautista, G.P. Rodriguez, A.J. Vazquez, “Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by **solar cladding process**”, **Solar Energy**, 80:1338-1343, 2006.

N. Murugan, R.S. Parmar, “Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel”, **Journal of Materials Processing Technology**, 41:381-398, 1994.