

Análise de índices de classificação de sistemas de medição estimados por distintos arranjos experimentais em estudos de repetitividade e reprodutividade

Rogério Santana Peruchi (UFPA) rogerioperuchi@gmail.com
Rafael Gomes Nóbrega Paiva (UFPA) rafaelgnpaiva@gmail.com
Lavínia Maria Mendes Araújo (UFPA) lavinia.mendes2@gmail.com

Resumo:

Na busca pela qualidade de um processo de fabricação, é necessário controlar e avaliar uma causa de variação inevitável, o erro de medição. O estudo de Repetitividade e Reprodutividade (Gage Repeatability and Reproducibility – GR&R) é o mais usado para os componentes de variação em análise do sistema de medição (MSA). Esta pesquisa visa comparar o GR&R cruzado e o GR&R expandido a partir de suas estimativas dos índices de classificação do sistema de medição, o primeiro se limita a estimar a variação do processo de fabricação apenas pela diferença entre as peças, já o segundo pode estimar essa variação de forma mais eficiente usando mais fatores em um modelo de análise de variância. Esta comparação foi realizada em um experimento de soldagem de revestimento, analisando o fator de resposta área de penetração. As contribuições são apontar, no contexto desse experimento, qual é o melhor arranjo experimental para a classificação do sistema de medição e qual é o mais eficiente para diagnosticar os erros de reprodutividade e repetitividade.

Palavras chave: Análise de Sistema de Medição, Repetitividade, Reprodutividade

Analysis of indices of classification of measurement systems estimated by different experimental arrangements in repeatability and reproducibility studies

Abstract

In the quest for the quality of a manufacturing process, it is necessary to control and evaluate a unavoidable source of variation, the measurement error. The Gage Repeatability and Reproducibility (GR&R) studies is most commonly used for sources of variation into the Measurement System Analysis (MSA). The aim of this research is to compare the crossed GR&R and the expanded GR&R from their estimation of the indexes of classification of the measurement system, the first is limited to estimate the variation of the manufacturing process only by the difference between the pieces, the second is more efficiently using more factors in a variance analysis model. This comparison was performed in a coating welding experiment by analyzing the penetration area response factor. The contributions are to point out in the context of this experiment what is the best experimental arrangement for the classification of the measurement system and which is the most efficient to diagnose reproducibility and repeatability errors.

Key-words: Measurement System Analysis, Repeatability, Reproducibility

1. Introdução

Os estudos que envolvem o “erro zero” nos processos de fabricação estão focados em reduzir variabilidade. Quando o processo não é capaz, ações de melhoria devem ser implementadas. No entanto, é possível que a capacidade do processo seja boa, mas as medições dos produtos não. Isto é, a variação das medições é significativa diante da variação do processo. Assim, esforços de melhoria apenas no processo não serão suficientes para reduzir variabilidade. Por isso, os projetos de qualidade, devem focar tanto em análise do sistema de medição, quanto do processo. (AIAG, 2010; AL-REFAIE; BATA, 2010; PEREIRA *et al.*, 2016; PERUCHI *et al.*, 2014; PERUCHI *et al.*, 2013)

As dimensões apresentadas pelo sistema de medição podem apresentar erros, isto é, a medição possui algum desvio diante da dimensão real da peça. Estudo de Repetitividade e Reprodutividade (GR&R) é utilizado para medir os componentes de variação em análise do sistema de medição (MSA). Com ele pode-se verificar se a variação do MSA é pequena, tendo em vista a variação do processo de fabricação. (PERUCHI *et al.*, 2014; PERUCHI *et al.*, 2013)

Uma importante premissa para conduzir análise de sistemas de medição é selecionar peças que representem a amplitude real de variação do processo de fabricação. Tal requisito pode ser atendido usando técnicas de projeto de experimentos (*design of experiments* – DOE) para promover tal variação no processo de fabricação. O estudo GR&R cruzado é o mais utilizado para se avaliar o erro aleatório de sistemas de medição. No entanto, esta estratégia se limita a estimar a variação do processo de fabricação apenas pela diferença entre as peças. Para o mesmo experimento, um estudo GR&R expandido pode ser capaz de estimar a variação do processo de fabricação de forma mais efetiva usando mais fatores em um modelo de análise de variância. Na literatura encontram-se diversos estudos que utilizando o GR&R cruzado como método de análise (AL-REFAIE; BATA, 2010; ALSHRAIDEH *et al.*, 2016; CEPOVA *et al.*, 2018; DALALAH; DIABAT, 2015; HA; KIM; PARK, 2017; LI; AL-REFAIE, 2008; PAN, 2006; PEREIRA *et al.*, 2016; PERUCHI *et al.*, 2014; SHI *et al.*, 2016; WANG; CHIEN, 2010; ZANOBINI *et al.*, 2016) Entretanto, na literatura existem poucos estudos relacionados ao GR&R expandido, como o de Senol (2004) e Awaf *et al.* (2009).

O objetivo desse estudo é comparar as estimativas dos índices de classificação de sistemas de medição obtidos por estudos GR&R cruzado e expandido para um mesmo experimento. Esse experimento consiste em um processo de soldagem de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L. Uma contribuição importante é a determinação do melhor arranjo experimental para se estimar os índices de classificação do sistema de medição. Além de identificar qual método é mais eficiente para diagnosticar os erros aleatórios de repetitividade e reprodutividade.

Este estudo estrutura-se em cinco seções. A primeira é a presente introdução. A segunda apresenta a base teórica. A terceira refere-se à metodologia de pesquisa. A quarta à análise dos resultados. Finalmente, a quinta expõe os aspectos conclusivos.

2. Referencial Teórico

2.1 Estudo de repetitividade e reprodutividade (GR&R)

A análise do sistema de medição, a partir do GR&R, é uma importante ferramenta para os projetos de melhoria da qualidade. Por ela, é possível identificar se a variabilidade das medições é influente ou não na variação total do processo (AL-REFAIE; BATA, 2010; SHI *et al.*, 2014). As principais fontes de variação do sistema de medição, de acordo com Burdick *et al.* (2005),

podem ser: operadores, instrumento de medição, condições ambientais, dentre outras.

O GR&R aborda dois tipos de erro de medição. O primeiro é a repetitividade, isto é, a variação das repetidas medições de uma peça sob as mesmas condições de medição. Refere-se ao o erro aleatório das medições e à variação dentro do sistema. O segundo é a reprodutividade. Este pode vir da variação das médias das medições feitas por diferentes operadores em uma mesma peça, ou seja, da interação peça e operador. Também da variação das médias das medições por operador. Consiste, assim, na variação entre os sistemas de medição (AQUILA et al., 2018; BURDICK, et al., 2005; DALALAH; HANI, 2016; MARQUES et al., 2018; PERUCHI, et al., 2013; WANG; CHIEN, 2010; YU et al., 2017). Os dois métodos mais utilizados na análise do GR&R são: análise de variância (ANOVA) e os gráficos X-bar e R. A ANOVA é o método mais utilizado. Isto, porque consegue identificar o erro de medição da interação peça operador (AIAG, 2010; WANG; CHIEN, 2010)

O modelo geral da ANOVA, em análise de sistema de medição, é dado na Equação 1. Em que Y é o valor medido de uma peça aleatória de um determinado processo. X é a medida verdadeira da peça, e E é o erro de medição. X e E são variáveis aleatórias e independentes. Suas médias são representadas por μ_p e μ_{sm} , e variâncias por $\hat{\sigma}_p^2$ e $\hat{\sigma}_{sm}^2$, respectivamente. É importante saber que os erros geralmente são eliminados pela calibração do sistema, assim, $\mu_{sm} \cong 0$ e consequentemente $\mu_Y = \mu_p$. (BURDICK, et al., 2005; PERUCHI, et al., 2014)

$$Y = X + E \quad (1)$$

A Equação (2) ilustra o modelo da ANOVA para dois fatores aleatórios cruzados e com interação. Este analisa uma única característica da qualidade “ y_{ijk} ”. Desta forma, “p” representa o número de peças, “o” o número de operadores; e “r” o número de réplicas. Além disso, μ é a média dos valores medidos, e α_i , β_j , $\alpha\beta_{ij}$ representam peça, operador, e o efeito da interação entre peça e operador, respectivamente. (BURDICK, et al. 2005; PERUCHI, et al., 2014)

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

A variação do sistema de medição ($\hat{\sigma}_{sm}^2$) pode ser estimada pela Equação. (3) (DOLEZAL, et al., 1998; LI; AL-REFAIE, 2008). Os outros componentes de variância, como a do processo ($\hat{\sigma}_p^2$), de repetitividade ($\hat{\sigma}_{repetitividade}^2$), de reprodutividade ($\hat{\sigma}_{reprodutividade}^2$) seguem nas Equações 4, 5, 6 e 7. (BURDICK, et al., 2005)

$$\hat{\sigma}_{sm}^2 = \hat{\sigma}_{repetitividade}^2 + \hat{\sigma}_{reprodutividade}^2 \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_p^2 = \hat{\sigma}_\alpha^2 \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_{repetitividade}^2 = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_{reprodutividade}^2 = \hat{\sigma}_\beta^2 + \hat{\sigma}_{\alpha\beta}^2 \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_T^2 = \hat{\sigma}_p^2 + \hat{\sigma}_{sm}^2 \quad (7)$$

Existem casos em que a ANOVA pode conter fatores fixos e aleatórios, sendo este modelo denominado “misto”. Se em uma análise do sistema de medição, os operadores não são retirados de uma população de operadores, isto é, as medições são feitas por todos os operadores, é apropriado tratá-los como efeitos fixos (DOLEZAL *et al.*, 1998). Logo, o modelo assumirá que β_j é um efeito fixo e $\sum \beta_j = 0$. Ainda, α_i , $\alpha\beta_{ij}$ e ε_{ijk} são fatores aleatórios (BURDICK *et al.*, 2005; DOLEZAL *et al.*, 1998; MONTGOMERY, 2013). Desta forma, a variância da reprodutividade será igual, apenas, a variância da interação entre peça e operador ($\hat{\sigma}_{\alpha\beta}^2$)

A aceitabilidade de um sistema de medição pode ser estimada em termos de desvio padrão ou variância. Neste artigo, esta será analisada em termos de variância. Sendo a razão entre a variância do sistema de medição e a variância total Equação 8. (HA *et al.*, 2017; ZANOBINI *et al.*, 2016)

$$\%R \& R = \left(\frac{\hat{\sigma}_{sm}^2}{\hat{\sigma}_T^2} \right) 100 \quad (8)$$

Por conseguinte, se o índice R&R for inferior a 1%, o sistema é considerado aceitável. Entre 1% e 9 %, é considerado marginal. Sendo assim, sua aceitação dependerá da aplicação, custo do reparo, entre outros fatores. Acima de 9% o sistema é considerado inaceitável, e deve ser melhorado (HA *et al.*, 2017; ZANOBINI *et al.*, 2016). A Figura 1 esquematiza estes parâmetros.

	Inaceitável	$\%R\&R > 9\%$
	Marginal	$1\% \leq \%R\&R < 9\%$
	Aceitável	$\%R\&R < 1\%$

Fonte: Adaptado Ha et al. (2017); Zanobini et al. (2016)

Figura 1 – Classificação do sistema de medição

2.2. GR&R Expandido

É possível que em processos industriais sejam necessários mais de dois fatores, além de peças e operadores, para compor a análise do sistema de medição. Burdick *et al.* (2005) afirma que arranjos cruzados ou fatoriais podem ser expandidos para mais de dois fatores. Um modelo que inclui três fatores, por exemplo, está ilustrado na Equação 9. O modelo consistirá na média geral das medições “ μ_Y ”, o efeito principal de todos os três fatores “ P_i ”, “ O_j ” e “ T_k ”, as interações de segunda ordem “ $(PO)_{ij}$ ”, “ $(PT)_{ik}$ ” e “ $(OT)_{jk}$ ”, a interação de terceira ordem “ $(POT)_{ijk}$ ”, e o erro “ E_{ijkl} ”. Para mais, “ i ”, “ j ”, “ k ” são os níveis de P, O e T, respectivamente, e “ l ” é o nível das réplicas.

$$Y_{ijk} = \mu_Y + P_i + O_j + T_k + (PO)_{ij} + (PT)_{ik} + (OT)_{jk} + (POT)_{ijk} + E_{ijkl} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, t \\ l = 1, 2, \dots, r \end{array} \right. \quad (9)$$

3. Materiais e métodos

Esse trabalho tem uma abordagem quantitativa experimental. Sendo assim, o método de pesquisa utilizado baseia-se nos sete passos para Projeto e Análise de Experimentos, desenvolvidos por Montgomery (MONTGOMERY, 2013). As três primeiras etapas consistem em planejamentos pré experimento, enquanto as demais ocorrem após a realização do mesmo. Os passos são os seguintes:

- a) Definir o problema: definir o problema de um experimento nem sempre é uma tarefa simples. É importante apontar as ideias acerca do problema, assim como, o objetivo do experimento. Estas informações possibilitam um melhor entendimento e orientação acerca do processo, bem como, as eventuais soluções para o problema;
- b) Selecionar Variáveis de Respostas: deve-se escolher variáveis que sejam relevantes para o processo em estudo. Por exemplo, especificações que os clientes almejam, requisitos de normas ou do próprio processo;
- c) Escolher fatores e seus níveis: deve-se selecionar fatores para serem variados no experimento e determinar seus respectivos níveis. Geralmente, esses fatores são selecionados por conhecedores do processo e da teoria;
- d) Escolher o arranjo experimental: se os três passos anteriores tiverem sido feitos corretamente, usualmente, esta etapa será realizada sem complicações. A escolha de um arranjo envolve consideração do número de réplicas, seleção adequada da ordem de execução, e outras restrições de randomização;
- e) Executar o experimento: na execução do experimento sugere-se que o processo seja bem monitorado para saber se está ocorrendo conforme o que foi pré-estabelecido;
- f) Análise estatística dos dados: métodos estatísticos devem ser utilizados para analisar os dados, para que assim, conclusões e recomendações possam ser dadas mediante o experimento. Nesta etapa, existem softwares e métodos gráficos que podem auxiliar;
- g) Conclusões e recomendações: após a análise estatística, respostas práticas serão apresentadas para o problema uma vez apresentado.

4. Resultados e Discussão

Neste tópico, será descrito o procedimento experimental. Ainda, será justificada a escolha do fator de resposta. Serão descritos as variáveis de entrada, o arranjo experimental e os resultados do experimento. Estes últimos serão analisados estatisticamente de três formas. Por fim, as análises serão comparadas.

4.1 Procedimento experimental e de medição

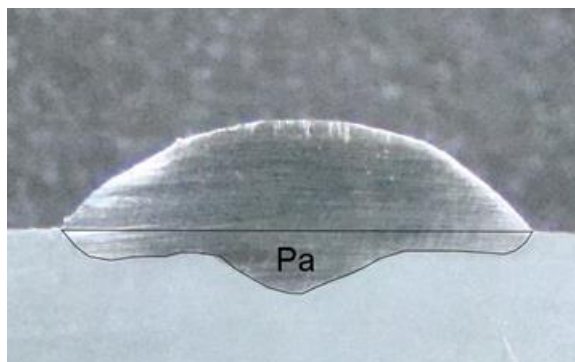
O procedimento experimental realizado foi o de soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L, utilizando arame tubular. Este processamento pode ser definido como a deposição de uma camada de metal de adição, neste caso, o aço inoxidável, sobre a superfície de um metal base, o aço carbono, a fim de se obter propriedades anti-corrosivas.(SOWRIRAJAN *et al.*, 2018)

A resposta a ser estudada é a área de penetração. Esta compõe parte do percentual da diluição da soldagem de revestimento (PALANI; MURUGAN, 2007). Este último é um fator primordial para determinar a qualidade da soldagem. Ao aumentar a área de penetração, aumenta-se a diluição, isso resulta em uma maior interação entre o metal base e o de adição. Tal fato é prejudicial para a qualidade do efeito anti-corrosivo (SHAHI; PANDEY, 2008).

Quanto aos parâmetros de entrada, têm-se 3 operadores, 8 peças e 2 ferramentas. Para a análise do GR&R expandido, três parâmetros serão acrescidos: a velocidade de alimentação do arame (V_a), a velocidade de soldagem (V_s) e a tensão (T). Vale salientar que para este caso as peças não serão mais parâmetros de entrada. O arranjo experimental utilizado foi o Fatorial Geral Completo. Este é utilizado quando os parâmetros possuem diferentes níveis. Por exemplo, existem a níveis para o fator A, b níveis para o fator B, e c níveis para o fator C (MONTGOMERY, 2013). O arranjo resultou em um total de 144 medições e 3 réplicas.

As medições da área de penetração foram feitas com o auxílio do software analisador de imagens ImageJ®. Nele, utilizou-se duas ferramentas para a medição: “polígono” e “freehand”. Isto, a fim de avaliar se há influência no uso de alguma destas no erro de medição. O resultado das medições é gerado em pixels, por isso, fez-se a conversão para milímetros através da Equação 10, adaptada de Pereira *et al.* (2016). Onde M_{mm} é o valor medido em milímetros, M_{pix} é o valor medido em pixels, R_{mm} é o valor referência, dado pela espessura do corpo de prova no valor de 6,35mm e R_{pix} que é o valor da espessura do corpo de prova medido pelo software em pixels. A Figura 2 ilustra um cordão de solda destacando a sua área de penetração.

$$M_{mm} = \frac{M_{pix} \times R_{mm}}{R_{pix}} \quad (10)$$



Fonte: Elaborado pelos autores.
Figura 2 - Área de Penetração.

4.2 Análise do sistema de medição

A partir dos dados obtidos pelo experimento, serão feitos três tipos de análises estatísticas do sistema de medição pelo GR&R, sendo: (1) GR&R expandido com interações, (2) GR&R cruzado e (3) GR&R expandido sem interações. Os resultados obtidos serão comparados.

4.2.1 Análise e Comparação entre o GR&R Expandido com interações e o GR&R Cruzado

Para o GR&R expandido com interação foram avaliados cinco fatores, sendo dois relacionados com a medição (Operador e Ferramenta) e três à fabricação (Velocidade de alimentação do arame, Velocidade de soldagem e Tensão). Seu modelo segue na Equação 11. Assim, $(\alpha\beta)_{ij}$ é a interação de segunda ordem entre os fatores de medição, $(\tau\eta)_{kl}$, $(\tau\nu)_{km}$, $(\eta\nu)_{lm}$ são as interações de segunda ordem entre os fatores de fabricação e $(\tau\eta\nu)_{klm}$ é a interação de terceira ordem entre os fatores de fabricação. Vale salientar que para este artigo, não se fez relevante a interação entre os fatores de fabricação e os de medição.

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + \eta_l + \nu_m + (\alpha\beta)_{ij} + (\tau\eta)_{kl} + (\tau\nu)_{km} + (\eta\nu)_{lm} + (\tau\eta\nu)_{klm} + \varepsilon_{ijklmn} \quad (11)$$

De acordo com a Tabela 1, o erro de medição desta análise é de 1,42%, ou seja, o sistema é marginal. O erro referente a repetitividade é de 0,85%. O de reprodutividade é de 0,57%, sendo este dividido entre o fator operador (0,56%) e ferramenta (0,02%). E a interação entre ferramenta e operador não foi relevante para a análise pois seu *p-value* foi menor que 0,05 na ANOVA.

Para o GR&R cruzado foram considerados dois fatores aleatórios principais: peças e operadores. Também a interação entre estes. É possível notar, pela Tabela 1, que o erro de medição consiste em 2,36%, ou seja, o sistema é marginal. O erro devido a repetitividade resultou em 0,78%. Quanto à reprodutividade, encontrou-se 1,58%. A reprodutividade, neste caso, é dividida em dois fatores: média dos operadores utilizando determinada ferramenta (OpFerr) e na interação entre operador-ferramenta e peça (OpFerr*Peça). Observa-se que o primeiro fator tem maior contribuição na reprodutividade, com um índice de 0,93%, enquanto o segundo tem 0,65%.

Ao analisar os resultados dos componentes de variação das análises GR&R Expandido com interações e GR&R Cruzado, pode-se perceber que no primeiro existe uma descrição mais detalhada daquilo que compõe as contribuições referentes as medições (Total Gage R&R) e a variação do processo de fabricação.

Na análise expandida existem as variáveis operador e ferramenta como fatores independentes de medição, além das interações destes. Não é possível perceber isso no cruzado, pois só é permitido incluir um fator independente de medição. De forma análoga, a variação do processo de fabricação possui três fatores e suas interações no GR&R expandido. Já no cruzado a contribuição é apenas da variável peça, isto pode ser observado na Tabela 1.

GR&R Expandido com interações		GR&R Cruzado	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
Total Gage R&R	1,42	Total Gage R&R	2,36
Repetitividade	0,85	Repetitividade	0,78
Reprodutividade	0,57	Reprodutividade	1,58
Operador	0,56	OpFerr	0,93
Ferramenta	0,02	OpFerr*Peça	0,65
Variação do processo de fabricação	98,58	Variação do processo de fabricação	97,64
Va	42,46		
T	15,65		
Vs	16,23		
Va*T	11,41		
Va*Vs	0,43		
T*Vs	3,97		
Va*T*Vs	8,43		
Variação Total	100	Variação Total	100

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 1 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R Expandido com interações e o GR&R Cruzado

4.3.2 Comparação entre GR&R Expandido com interações com GR&R Expandido sem interação

A análise do GR&R expandido com interações é a mesma da seção anterior. Já para o GR&R expandido sem interação, têm-se o modelo da Equação 12. O fator α representa os operadores, o β as ferramentas, o τ a Tensão, o η a Velocidade de alimentação do arame, por fim, o fator ν Velocidade de soldagem. Neste modelo, μ é a média das medições, $\alpha_i, \beta_j, \tau_k, \eta_l, \nu_m$ são os efeitos principais dos cinco fatores, assim como, ε_{ijklmn} é o erro.

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + \eta_l + \nu_m + \varepsilon_{ijklmn} \quad (12)$$

A contribuição do erro de medição é de 9,43%, por isso, o sistema é considerado inaceitável, a repetitividade possui 8,89% de contribuição e a reprodutividade 0,54%, sendo destes 0,53% referentes ao operador e 0,01% à ferramenta, resultados expostos na Tabela 2.

Na comparação entre as análises dos GR&R expandido com interações e sem interação, as variáveis de medição e fabricação são as mesmas. Porém, pela ausência de termos não lineares, que são as interações, no segundo caso há um excessivo percentual atribuído à repetitividade, e esta representa o erro do modelo. Percebe-se que ao incluir interações no modelo de análise de variância, ele se torna mais completo. Isso, porquê o erro acumulado no estudo sem interação irá para as variáveis do processo de fabricação. Diminuindo o percentual devido à repetitividade.

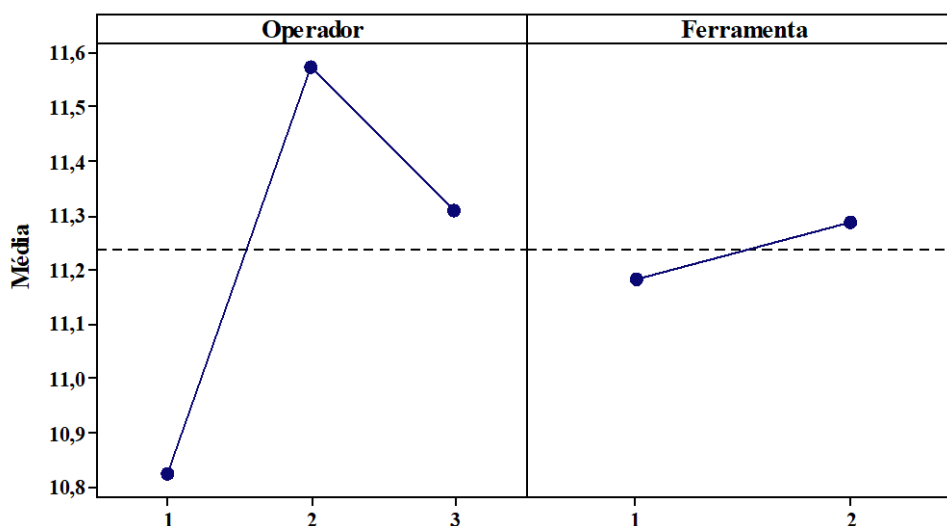
GR&R Expandido com interações		GR&R Expandido sem interação	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
Total Gage R&R	1,42	Total Gage R&R	9,43
Repetitividade	0,85	Repetitividade	8,89
Reprodutividade	0,57	Reprodutividade	0,54
Operador	0,56	Operador	0,53
Ferramenta	0,02	Ferramenta	0,01
Variação do processo de fabricação	98,58	Variação do processo de fabricação	90,57
Va	42,46	Va	47,46
T	15,65	T	23,87
Vs	16,23	Vs	19,24
Va*T	11,41		
Va*Vs	0,43		
T*Vs	3,97		
Va*T*Vs	8,43		
Variação Total	100	Variação Total	100

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R Expandido com interações e o GR&R Expandido sem interação

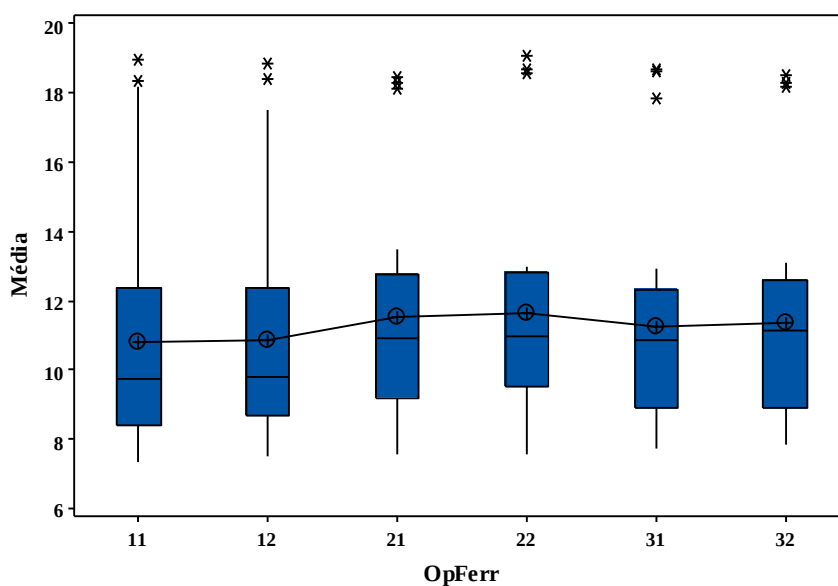
4.3 Análises Gráficas

As análises gráficas do GR&R expandido com e sem interações são as mesmas. Para a reprodutividade, tem-se o gráfico de efeito principal (Figura 3). Nele são dadas as médias gerais de cada operador e de cada ferramenta relacionados com a resposta. Observa-se que a média geral do operador 1 é menor que a dos outros dois. Enquanto que a diferença entre a média das ferramentas é mínima, ou seja, não há influência no uso de ambas.



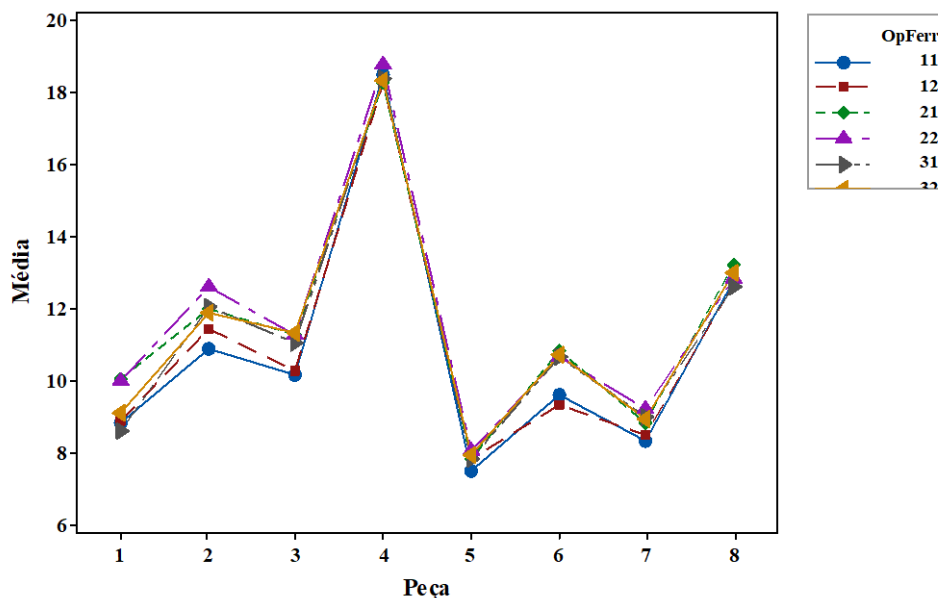
Fonte: Elaborado pelos autores.
Figura 3 – Médias dos efeitos principais

Na análise da reprodutividade pelo GR&R obteve-se dois diferentes gráficos. O primeiro refere-se ao gráfico das médias (Figura 4). Por ele nota-se que em todas as médias houveram *outliers*. Isto é, algumas medições estão destoantes da média geral. Ainda, a média geral do operador 2 com as ferramentas 1 e 2, estão mais distantes das dos demais operadores.



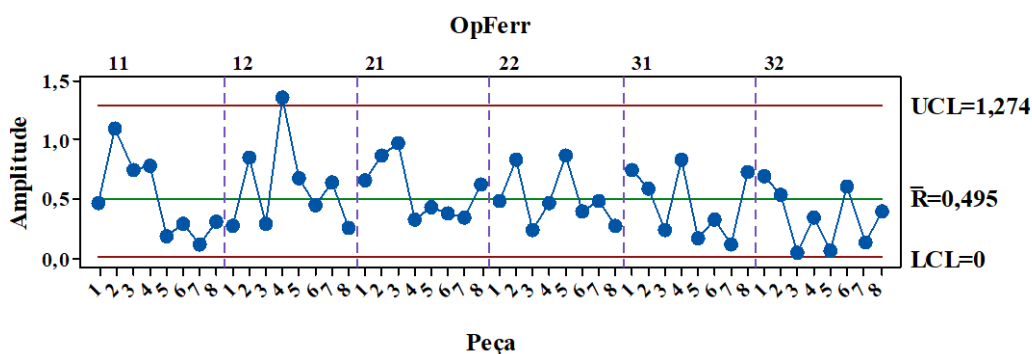
Fonte: Elaborado pelos autores.
Figura 4 – Médias Geral dos Operadores por Ferramenta

O segundo (Figura 5) é o gráfico de interação OpFerr*Peça, nele estão expostas as médias das medições dos operadores, por peça. Pode-se observar, por exemplo, que na peça 6 as medições do operador 1 com ambas as ferramentas, diferiu-se dos demais.



Fonte: Elaborado pelos autores.
Figura 5 – Gráfico da Interação OpFerr*Peça

Para análise da repetitividade, nos 3 cenários, o Rchart apresentou o mesmo resultado (Figura 4). Ele representa a amplitude das medições de cada operador com cada ferramenta. Nota-se que o operador 1 utilizando a ferramenta 2, teve uma amplitude acima do limite superior aceitável (UCL = 1,274).



Fonte: Elaborado pelos autores.
Figura 6 – Rchart em análise expandida.

5. Conclusões

O objetivo deste estudo foi comparar índices de classificação de sistemas de medição a partir dos estudos de GR&R Cruzado, GR&R expandido sem interação e GR&R expandido com interações. Para isso, foram analisados dados experimentais de um processo de soldagem de revestimento, cuja resposta de estudo é a “área de penetração”. Os resultados obtidos expuseram que o processo de medição é marginal quando analisado pelo GR&R cruzado e pelo Expandido com interações. Enquanto que no GR&R expandido sem interação o sistema é inaceitável.

É possível afirmar que o melhor arranjo experimental para o presente experimento é o GR&R Expandido com interações. Pois, quando comparado ao Cruzado ele avalia a influência do sistema de medição na variabilidade do processo com mais fatores tanto no tocante das variáveis de medição quanto nas de fabricação. Já em relação ao Expandido sem interações, ele é mais eficiente por incluir fatores não lineares e diminui o erro acumulado do modelo de Análise de Variância. Por fim, sugere-se para futuros estudos, fazer a comparação destes cenários em outros processos de fabricação, bem como, em situações multivariadas.

Referências

- Automotive Industry Action Group (AIAG).** *Measurement Systems Analysis*. 4 ed. Detroit, MI, USA, 2010.
- AL-REFAIE, A.; BATA, N.** Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. *Measurement*. v. 43, p. 842–851, 2010.
- ALSHRAIDEH, H. et al.** *Reference Range Estimation: Accounting for Measurement System Errors*. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 32, n. 3, p. 901–908, 2016.
- AQUILA, G. et al.** *Analysis of the wind average speed in different Brazilian states using the nested GR&R measurement system*. *Measurement*, v. 115, p. 217–222, 2018.
- AWAD, M. et al.** *A measurement system analysis approach for hard-to-repeat events*. *Quality Engineering*, v. 21, n. 3, p. 300–305, 2009.
- BURDICK, R. K.; BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C.** *Design and Analysis of Gauge R&R Studies: Making Decisions with Confidence Intervals in Random and Mixed ANOVA Models*. 17 ed. SIAM: 2005.
- CEPOVA, L. et al.** *Measurement System Analyses – Gauge Repeatability and Reproducibility Methods*. *Measurement Science Review*, n. 1, p. 20–27, 2018.
- DALALAH, D.; DIABAT, A.** *Repeatability and reproducibility in med labs: a procedure to measurement system analysis*. *IET Sci. Meas. Technol.*, v. 9, n. 7, p. 826–835, 2015.
- DALALAH, D.; HANI, D.** *A precision-to-tolerance ratio model for the assessment of measurements uncertainty*. *Precision Engineering*, v. 44, p. 143–151, 2016.
- DOLEZAL, K. K.; BURDICK, R. K.; BIRCH, N. J.** *Analysis of a two-factor R & R study with fixed operators*. *Journal of Quality Technology*, v. 30, n. 2, p. 163–170, 1998.
- HA, C.; KIM, D.S.; PARK, S.** *Assessment of the Adequacy of Gauge Repeatability and Reproducibility Study Using a Monte Carlo Simulation*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- LI, M.; AL-REFAIE, A.** *Improving Wooden Parts' Quality by Adopting DMAIC Procedure*. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 24, p. 351–360, 2008.
- MARQUES, C. et al.** *Improving operator evaluation skills for defect classification using training strategy supported by attribute agreement analysis*. *Measurement*. v. 119, p. 129–141, 2018.
- MONTGOMERY, D. C.** *Design and Analysis of Experiments*. 8 ed., 2013.
- PALANI, P. K.; MURUGAN, N.** *Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW*. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 190, n. 1–3, p. 291–299, 2007.
- PAN, J. N.** *Evaluating the gauge repeatability and reproducibility for different industries*. *Quality and Quantity*, v. 40, n. 4, p. 499–518, 2006.
- PEREIRA, R. B. D. et al.** *Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify special causes of variation*. *Measurement*, v. 82, p. 135–144, 2016.
- PERUCHI, R.S. et al.** *Weighted approach for multivariate analysis of variance in measurement system analysis*. *Precision Engineering*, v. 38, n. 3, p. 651–658, 2014.
- PERUCHI, R. S. et al.** *A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics*. *International Journal of Production Economics*, v. 144, n. 1, p. 301–315, 2013.
- SENOL, S.** *Measurement system analysis using designed experiments with minimum α - β risks and n*.

Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, v. 36, n. 2, p. 131–141, 2004.

SHAHI, A. S.; PANDEY, S. *Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures.* Journal of Materials Processing Technology, v. 196, n. 1–3, p. 339–344, 2008.

SHI, L. et al. *A Modified Region Approach for Multivariate Measurement System Capability Analysis.* Quality and Reliability Engineering International, v. 32, n. 1, p. 37–50, 2016.

SHI, L.; CHEN, W.; LU, L. F. *An approach for simple linear profile gauge R&R studies.* Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014.

SOWRIRAJAN, M.; KOSHY M. P.; VIJAYAN, S. *Simultaneous multi-objective optimization of stainless steel clad layer on pressure vessels using genetic algorithm.* Journal of Mechanical Science and Technology, v. 32, n. 6, p. 2559–2568, 2018.

WANG, F. K.; CHIEN, T. W. *Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study.* Computers and Industrial Engineering, v. 58, n. 1, p. 143–150, 2010.

YU, Y. et al. *R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber.* Measurement, v. 95, p. 293–296, 2017.

ZANOBINI, A et al. *Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems.* Measurement, v. 86, p. 125–132, 2016.