

ESTUDO GR&R DE MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE DE FUROS OBTIDOS POR FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO NO AÇO AISI H13 ENDURECIDO

Rafaela Aparecida Mendonça Marques, rafaelaamm@hotmail.com¹

Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufs.br¹

Fernanda Souza de Oliveira, fernandasouza.o@hotmail.com¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br²

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG 36880-000, Brasil.

²Instituto de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade Federal de Itajubá, Avenida BPS, 1303, Itajubá, MG 37500-903, Brasil.

Resumo: O processo de fresamento helicoidal interpolado possibilita a obtenção de furos acabados em uma única operação. Para garantir a intercambialidade, os furos obtidos devem apresentar acabamento superficial e erro geométrico dentro dos níveis de tolerância estabelecidos. Com a finalidade de averiguar a capacidade dos procedimentos e do sistema de medição de rugosidade, um estudo da repetibilidade e reprodutibilidade (Gage repeatability and reproducibility – GR&R) foi proposto. Foram considerados três operadores, dez peças e um sistema de medição para rugosidade. As peças foram selecionadas considerando diferentes níveis de acabamento microgeométrico, de forma a averiguar a capacidade de cada operador e do sistema de medição de medirem diferentes níveis da escala do instrumento. Além do mais, cada operador mediu cada peça duas vezes para avaliar a repetibilidade dos procedimentos do sistema de medição. Uma vez que as respostas de rugosidade consideradas apresentam estrutura de correlação estatisticamente significativa, foi utilizada a análise de componentes principais viabilizando a avaliação da estrutura de variância - covariância das respostas. Os resultados apresentados indicam interações peça*operador não significativas, um sistema de medição classificado como marginal, e também, um melhor resultado GR&R após utilizar o método de componentes principais ponderadas. Sendo assim, é possível garantir a capacidade de medição de rugosidade dos furos obtidos pelo processo de fresamento helicoidal interpolado no aço AISI H13 no estado endurecido.

Palavras-chave: GR&R, Rugosidade, Fresamento Helicoidal interpolado

1. INTRODUÇÃO

Para garantir que as especificações de um produto sejam atendidas, é necessário medir os atributos do produto após a fabricação. Em qualquer amostra de medições realizadas com esse intuito, parte da variação observada é devido ao sistema de medição ($\sigma^2_{\text{medição}}$), enquanto outra parte é resultado do processo de produção ($\sigma^2_{\text{produção}}$) (AL-REFAIE; BATA, 2010; PERUCHI et al., 2014). Assim sendo, é possível estimar a variabilidade total observada ($\sigma^2_{\text{observada}}$) combinando essas duas componentes.

A qualidade dos dados de medição pode ser definida pelas propriedades estatísticas de múltiplas medições obtidas a partir de um sistema de medição que opera sob condições estáveis. A maior parte da variação de um conjunto de medições é devido à interação entre o sistema de medição e o ambiente (AIAG, 2010). A variabilidade do sistema de medição, para Awad et al. (2009) pode ser analisada através de um estudo da repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição (Gage Repeatability and Reproducibility - GR&R), sendo a repetibilidade a variabilidade encontrada em medições de uma mesma característica feitas pelo mesmo operador e reprodutibilidade a variabilidade encontrada em medições feitas por operadores diferentes. Em um estudo GR&R padrão, dois ou mais operadores medem uma amostra de peças várias vezes e as componentes de variância podem ser estimadas através da análise de variância (ANOVA). É esperado que a variação encontrada na repetibilidade e na reprodutibilidade seja baixa, de forma a garantir a capacidade do sistema de medição. Quando o sistema de medição apresenta problemas de reprodutibilidade, é necessário investigar qual operador está medindo de forma errada. Tais informações serão cruciais para orientar as ações a fim de reduzir a variabilidade assegurando homogeneidade dos resultados (PEREIRA et al., 2016).

Porém, na prática, é comum que as características de qualidade medidas sejam correlacionadas, de forma que a variação de tais características apresente uma dependência estatística. Além disso, a medida que o número de variáveis

estudadas aumenta, o estudo pelo GR&R univariado se torna mais complexo. Então, uma vez que é identificada correlação estatisticamente significativa entre as respostas medidas, é possível e aconselhável realizar uma análise multivariada. Esse tipo de estudo permite a sintetização dos dados permitindo uma melhor análise da variabilidade.

A análise de componentes principais reduz muitas variáveis correlacionadas em um número menor de variáveis não correlacionadas (HE; WANG; COOK, 2011). Mingoti (2005) elucida que a análise de componentes principais (PCA) tem como objetivo principal explicar a estrutura de variância e covariância de combinações lineares, chamadas de componentes principais, das variáveis originais. Para encontrar as componentes principais é necessária a decomposição da matriz de covariâncias do vetor aleatório estudado e após a obtenção é possível calcular seus respectivos valores numéricos (*scores*) que podem ser estudados.

Por fim, esse artigo tem o propósito de apresentar um estudo GR&R multivariado utilizando a análise de componentes principais para respostas de rugosidade de furos, escolhidos propositalmente com diferentes níveis de rugosidade, em peças de aço AISI H13 endurecidas que foram submetidas ao processo de fresamento helicoidal utilizando diferentes parâmetros de usinagem para cada uma. Com esse estudo será possível estimar a capacidade do sistema de medição multivariado de medir peças de variados níveis de qualidade, através da estimativa da variabilidade obtida no processo de fabricação e de medição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Repetibilidade e Reprodutibilidade

A repetibilidade pode ser definida, com base na análise de variância, como a variação da causa interna ou comum da variação de ensaios em condições definidas de medição, ou ainda, como a capacidade ou potencial do instrumento (AIAG, 2010; PEREIRA et al., 2016). Ela é avaliada a partir de múltiplas medições realizadas pelo mesmo operador em que as mesmas características de qualidade são analisadas.

Já a reprodutibilidade é concebida como a variação entre ou causa especial relacionada à média das medições feitas por operadores distintos enquanto medem uma mesma característica de qualidade de uma peça em comum, ou também, relacionada com as mudanças nas condições ambientais (AIAG, 2010; PEREIRA et al., 2016; ASPLUND; LIN, 2016). A Figura 1 ilustra a diferença entre a variação devido a repetibilidade e a reprodutibilidade.

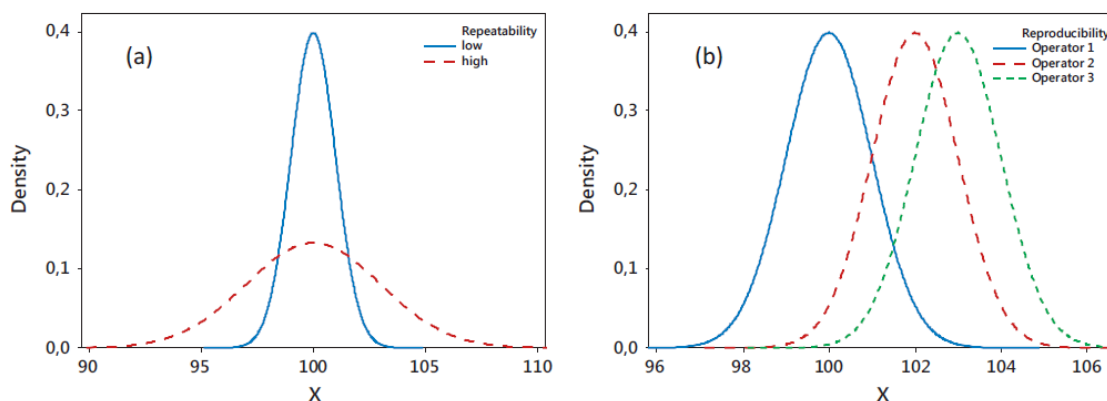


Figura 1. (a) Representação repetibilidade; (b) Representação reprodutibilidade. Fonte: PEREIRA et al., 2016

2.2. GR&R Univariado

Segundo Al-Refaie; Bata (2010), assim como para Loftus; Giudice (2014), um dos estudos utilizados para analisar os componentes de variância das medições é denominado de Estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade (GR&R), que tem como objetivo determinar se a variabilidade do sistema de medição é pequena em relação à variabilidade do processo monitorado. Além disso, o modelo de análise de variância (ANOVA) de efeitos aleatórios é frequentemente utilizado em estudos GR&R afim de avaliar a significância das fontes de variação e estimar os componentes de variabilidade.

Deshpande et al. (2014), expõe que, geralmente, o estudo GR&R é realizado de forma que represente toda a variação presente na especificação. Ou seja, algumas amostras próximas do limite inferior de especificação, outras próximas do limite superior e ainda, algumas na região próxima ao valor médio de especificação. O objetivo de estudar amostras distintas é avaliar se o sistema de medição é capaz de diferenciar todas elas, sendo ele, então, adequado para análises.

Seja um procedimento de medição em que a peças são medidas por b operadores aleatoriamente selecionados e que cada operador mede cada peça n vezes. O resultado da medição pode ser representado pelo modelo de efeitos aleatórios conforme mostra a Eq. 1:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

Onde τ_i , β_j , $(\tau\beta)_{ij}$ são variáveis aleatórias independentes e representam, respectivamente, os efeitos dos fatores peça, operador e interação, e ε_{ijk} é o erro aleatório. O modelo é comumente analisado utilizando-se o método de análise de variância de efeitos aleatórios (ANOVA), assim as componentes da variância são divididas e estimadas através dos quadrados médios (AL-REFAIE; BATA, 2010). As estimativas de variância do estudo GR&R são definidas como a Eq. 2 que segue:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}^2_{erro} &= MS_{erro} \\ \hat{\sigma}^2_{\tau\beta} &= \frac{MS_{P \times O} - MS_{erro}}{n} \\ \hat{\sigma}^2_{\beta} &= \frac{MS_O - MS_{P \times O}}{an} \\ \hat{\sigma}^2_{\tau} &= \frac{MS_P - MS_{P \times O}}{bn} \end{aligned} \quad (2)$$

Em que MS_{erro} , MS_P , MS_O e $MS_{P \times O}$ são, respectivamente, as médias dos quadrados para o erro, peça, operador e interação entre operador e peça. Para Erdmann; Does; Bisgaard (2009) e Al-Refaie; Bata (2010), a repetibilidade é representada pela variância do erro ($\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2$), e a reprodutibilidade pela variância do efeito operador mais a interação peça-operador de acordo com a Eq. 3. Sendo assim, a variação do sistema de medição é equivalente à soma das componentes de reprodutibilidade e repetibilidade, conforme a Eq. 4.

$$\hat{\sigma}^2_{reprodutibilidade} = \hat{\sigma}_{\beta}^2 + \hat{\sigma}_{\tau\beta}^2 \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}^2_{GR\&R} = \hat{\sigma}_{\beta}^2 + \hat{\sigma}_{\tau\beta}^2 + \hat{\sigma}_{\varepsilon}^2 \quad (4)$$

2.2.1. Critério de Aceitação

Os critérios de aceitação são necessários para decidir se um sistema de medição é útil para uma determinada meta e devem prescrever a quantidade de disparidade de medidas na mesma peça que é aceitável (ERDMANN; DOES; BISGAARD, 2009). Os critérios para sistemas de medição específicos dependem do ambiente e da finalidade do sistema de medição e devem ser acordados pelo cliente (AIAG, 2010).

O critério de aceitação adotado nesse artigo é descrito no manual MSA da AIAG. Ele avalia a percentagem de variação total do estudo GR&R em relação a percentagem total levando em consideração diversas outras fontes de variação. Segundo AIAG (2010), valores de %GR&R abaixo de 10% são considerados aceitáveis e sistemas de medição recomendados, principalmente em processos que requerem maior controle. Valores entre 10% e 30% são considerados aceitáveis, porém alguns elementos como importância da aplicação, custos e aprovação do cliente devem ser avaliados. Já valores acima de 30% são considerados inaceitáveis e todos os esforços devem ser feitos para melhoria do sistema de medição. A Figura 2 a seguir apresenta um resumo do critério de aceitação.

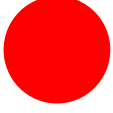
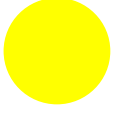
	Inaceitável	%R&R > 30%
	Marginal	10% < %R&R < 30%
	Aceitável	%R&R < 10%

Figura 2. Critério de aceitação. Fonte: AIAG, 2010; PERUCHI et al., 2013; PEREIRA et al., 2016.

2.3. Análise de Componentes Principais – Principal Component Analysis - (PCA)

Através da análise de componentes principais é possível transformar dados correlacionados em um novo conjunto de dados não correlacionados, chamados de componentes principais (*principal components* - PC). Os PCs são ordenados de tal forma que os primeiros retêm a maioria das variações presentes nas variáveis originais (HE; WANG; COOK, 2011).

As exposições a seguir foram baseadas em Mingoti (2013). Ao assumir que $F_1, F_2, \dots, F_p$ possuem correlação estatisticamente significativa, e podem ser escritas em forma de um vetor aleatório $Y = (Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_p)^T$ com médias $\mu = (\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_p)^T$ e matriz de covariância $\Sigma_{p \times p}$ com autovalores $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ e respectivos autovetores normalizados $e_1, e_2, \dots, e_p$. Sendo assim, os autovetores e_i satisfazem as seguintes condições: (i) $e_i^T e_j = 0$ para todo $i \neq j$; (ii) $e_i^T e_i = 1$ para todo $i = 1, 2, \dots, p$; (iii) $\Sigma_{p \times p} e_i = \lambda_i e_i$, para todo $i = 1, 2, \dots, p$. Logo, a j -ésima componente principal é dada pela seguinte combinação, como mostra a Eq. 5:

$$PC_j = \hat{e}_j Y = \hat{e}_{j1} Y_1 + \hat{e}_{j2} Y_2 + \dots + \hat{e}_{jp} Y_p \quad \{j = 1, 2, \dots, p\} \quad (5)$$

Porém, na prática, a matriz $\Sigma_{p \times p}$ é desconhecida e precisa ser estimada através da matriz $S_{p \times p}$ de acordo com as Eq. 6 e Eq. 7 a seguir:

$$S_{p \times p} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1p} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{p1} & S_{p2} & \dots & S_{pp} \end{bmatrix}, \text{ com } S_{ii} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i1} - \bar{Y}_1)^2}{n-1} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i1} - \bar{Y}_1)(Y_{ij} - \bar{Y}_j)}{n-1} \quad (7)$$

Algumas propriedades das componentes principais são apresentadas a seguir: (i) a variância estimada PC_j é igual a $\hat{\lambda}_j$, $j = 1, 2, \dots, p$; a covariância entre as componentes PC_j e PC_k é igual a zero, para todo $k \neq j$, logo, as componentes são não correlacionadas; a variância total explicada pela j -ésima componente amostral é dada pela Eq. 8 a seguir; assim como, a correlação estimada entre a j -ésima componente principal e a variável aleatória é dada pela Eq. 9.

$$\frac{\text{Var}[PC_j]}{\text{Variância Total Estimada de } Y} = \frac{\hat{\lambda}_j}{\sum_{j=1}^p \hat{\lambda}_j} \quad (8)$$

$$r_{PC_j, Y_i} = \frac{\hat{e}_{ji} \sqrt{\hat{\lambda}_j}}{\sqrt{S_{ii}}} \quad (9)$$

Considerando as exposições, a primeira componente principal é responsável pela maior proporção da variância total explicada, seguindo pela segunda componente e assim por diante. Normalmente, as primeiras componentes explicam parte significativa da variância total, reduzindo assim, a dimensão do problema para $k < p$. Há diferentes critérios de parada para estimar o número adequado de PC para serem analisadas, representando assim, o conjunto de dados. O critério de Kaiser considera que apenas as componentes que possuem autovalores superiores a 1 devem ser mantidas no problema (RENCHE, 2002). Segundo Wang; Chien (2010), apenas as componentes que explicam cerca de 80% a 90% da variação total devem ser selecionadas para análise.

2.3.3. Componentes Principais Ponderadas (WPC)

O método das componentes principais ponderadas (*weighted principal component* – WPC), foi proposto por Liao (2006). Esse método possibilita a obtenção de uma nova resposta que explica 100% da variabilidade dos dados e utiliza os scores obtidos na análise de componentes principais para realizar uma combinação linear considerando seus respectivos autovalores, de acordo com a Eq. 10. O método WPC foi inicialmente aplicado ao GR&R por PERUCHI (2011); PERUCHI *et al.* (2013), afim de obter um GR&R multivariado com 100% de explicação da variabilidade das respostas originais medidas.

$$WPC = \sum_{i=1}^p \lambda_i (PC_i) = \lambda_1 PC_1 + \lambda_2 PC_2 + \dots + \lambda_p PC_p \quad (10)$$

3. METODOLOGIA

As medições de rugosidade foram realizadas em um perfilômetro *Form Talysurf Intra* da *Taylor Hobson®*. Foram utilizados 10 corpos de prova com variados níveis de rugosidade, com furos obtidos através do processo de fresamento helicoidal interpolado em corpos de prova de aço AISI H13 endurecido. O processo de fresamento helicoidal é um processo de usinagem para obtenção de furos no qual a fresa realiza uma trajetória helicoidal de forma que tanto as arestas de corte periféricas quanto as frontais participam do processo de usinagem, com corte intermitente e contínuo, respectivamente. Deste modo, obtém-se um processo de corte mais suave, níveis de força axial mais baixos e maior precisão em uma única operação se comparado com a furação convencional (WANG et al., 2012). A Figura 3 a seguir apresenta o instrumento utilizado para as medições de rugosidade.

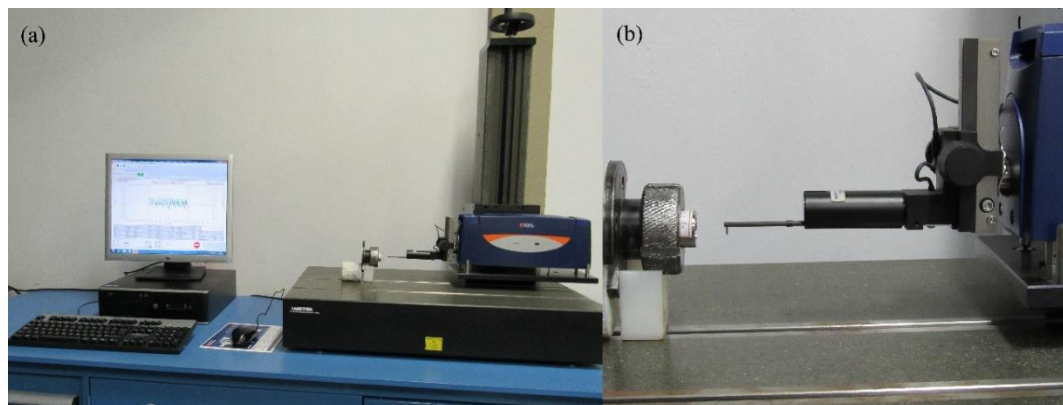


Figura 3. Medições de rugosidade (a) Equipamento utilizado para medições de rugosidade; (b) Posicionamento da peça para medição.

A medição de rugosidade foi realizada em três regiões da peça, sendo elas nomeadas de início (parte superior da superfície do furo), meio e fim (parte inferior do furo) de acordo com a Fig. 4 a seguir. Além disso, em cada uma dessas regiões foram realizadas três medições equispaçadas angularmente nas posições 0°, 120° e 240° e, então, obtidas as médias destas medições em cada região.

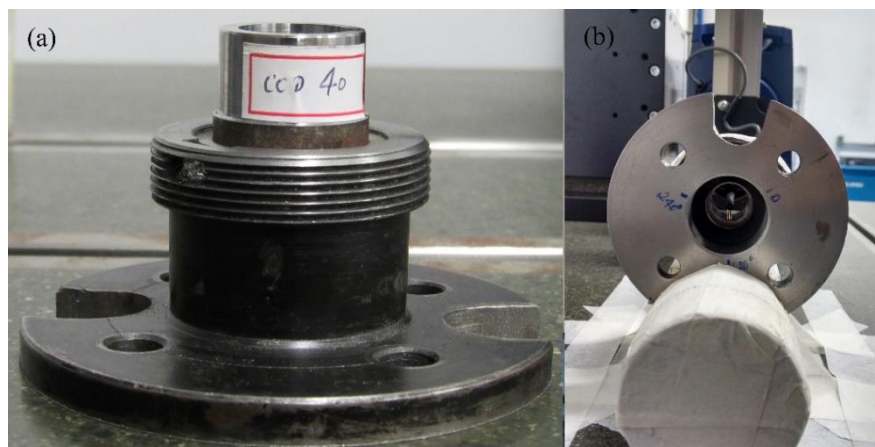


Figura 4. (a) Corpo de prova; (b) Posições angulares utilizadas

A resposta avaliada foi a rugosidade média (R_a) apresentada na unidade μm . A Tabela 1 a seguir apresenta como foi nomeada cada extensão das peças.

Foi utilizado um *cut-off* de 0,25 mm para gerar as análises dos dados. A Figura 5 apresenta a saída gráfica do equipamento. Para o estudo GR&R três operadores mediram duas vezes, dez peças cada um, totalizando 60 medições para os parâmetros de rugosidade. Foram utilizados os métodos univariados (ANOVA) e multivariados (PCA e WPC) para a análise dos parâmetros avaliados, com um nível de significância de 0,05. As análises foram realizadas no *software Minitab 2017*.

Tabela 1. Regiões medidas na extensão das peças

	Início	Meio	Fim
Região	Parte superior do furo	Região central do furo	Parte inferior do furo

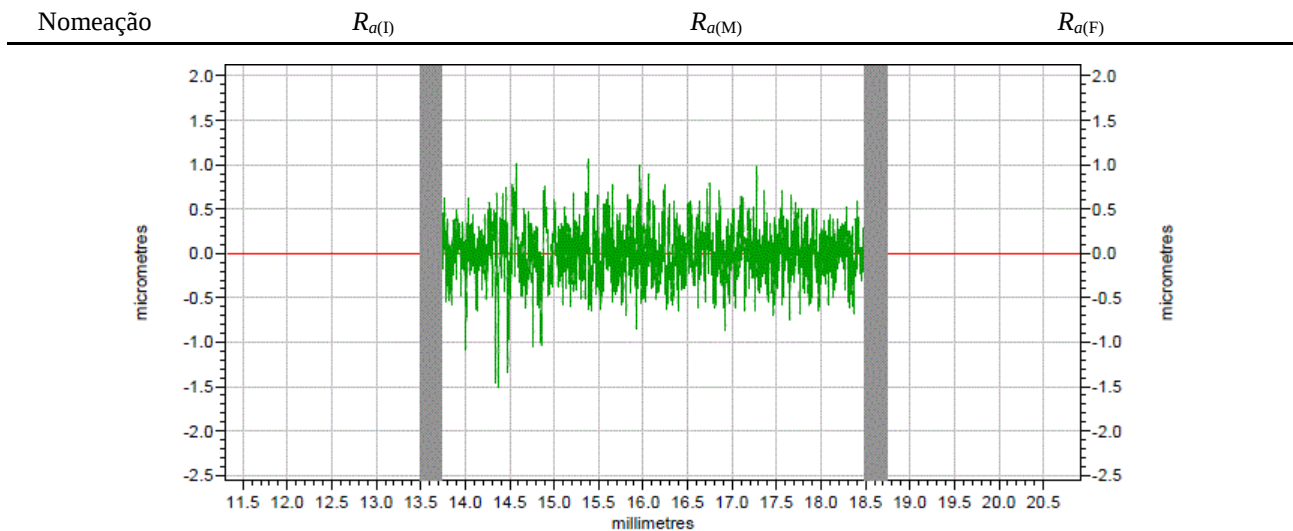


Figura 5. Saída gráfica de rugosidade

4. RESULTADOS

A Tabela 2 a seguir apresenta os resultados obtidos das 60 medições realizadas, considerando as variáveis $R_{a(l)}$, $R_{a(M)}$ e $R_{a(F)}$ de rugosidade.

Tabela 2. Resultados das medições para rugosidade

Nomeação	Op.	Réplica 1			Réplica 2		
		$R_{a(l)}$	$R_{a(M)}$	$R_{a(F)}$	$R_{a(l)}$	$R_{a(M)}$	$R_{a(F)}$
1	1	0,23	0,25	0,3	0,22	0,24	0,26
1	2	0,24	0,27	0,29	0,23	0,27	0,3
1	3	0,24	0,28	0,3	0,22	0,26	0,28
2	1	0,25	0,27	0,28	0,27	0,27	0,28
2	2	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
2	3	0,27	0,26	0,26	0,26	0,27	0,25
3	1	0,27	0,28	0,29	0,3	0,26	0,3
3	2	0,31	0,26	0,28	0,3	0,28	0,31
3	3	0,29	0,3	0,3	0,31	0,3	0,3
4	1	0,21	0,2	0,22	0,22	0,23	0,25
4	2	0,2	0,22	0,24	0,24	0,23	0,21
4	3	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23	0,25
5	1	0,2	0,22	0,24	0,22	0,21	0,24
5	2	0,23	0,22	0,25	0,2	0,22	0,24
5	3	0,21	0,24	0,26	0,22	0,22	0,23
6	1	0,25	0,25	0,28	0,27	0,25	0,34
6	2	0,26	0,24	0,32	0,25	0,25	0,33
6	3	0,26	0,27	0,34	0,27	0,24	0,35
7	1	0,18	0,2	0,2	0,19	0,19	0,19
7	2	0,18	0,2	0,2	0,18	0,19	0,2
7	3	0,18	0,2	0,2	0,18	0,2	0,2
8	1	0,37	0,43	0,47	0,39	0,45	0,48
8	2	0,36	0,42	0,47	0,36	0,44	0,49
8	3	0,36	0,45	0,49	0,35	0,45	0,5
9	1	0,23	0,21	0,22	0,21	0,23	0,24
9	2	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,24
9	3	0,21	0,23	0,24	0,21	0,22	0,23
10	1	0,26	0,28	0,3	0,27	0,29	0,34
10	2	0,26	0,29	0,3	0,28	0,3	0,36
10	3	0,27	0,28	0,33	0,27	0,26	0,3

Para verificar a possibilidade de realizar a análise multivariada, o teste de correlação de *Pearson* foi realizado para as variáveis de rugosidade ($R_{a(l)}$, $R_{a(M)}$ e $R_{a(F)}$). A Tabela 3 apresenta o resultado do teste de correlação das respostas com

seus respectivos *p-values*. É possível notar que todos os *p-values* são menores que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$) logo, pode-se confirmar que há correlação estatisticamente significativa entre as respostas rugosidade. Sendo assim, um estudo multivariado através da análise de componentes principais pode ser utilizado.

Tabela 3. Teste de correlação e *p-values* para rugosidade

	$R_{a(I)}$	$R_{a(M)}$
$R_{a(M)}$	0,915*	
	0,000**	
$R_{a(F)}$	0,904	0,951
	0,000	0,000

*Coeficiente de Pearson; ***p-value*

Foi realizada a análise de componentes principais considerando três componentes para rugosidade ($PC1_{(R)}$; $PC2_{(R)}$ e $PC3_{(R)}$). O resultado é apresentado na Tab. 4. É possível perceber que a primeira componente explica 94,9% da variabilidade total. Como a primeira componente ($PC1_{(R)}$) explica mais que 80% da variabilidade total e seu autovalor é o único acima de 1, apenas ela deve ser analisada.

Tabela 4. Análise de componentes principais para rugosidade

	R_a		
	$PC1_{(R)}$	$PC2_{(R)}$	$PC3_{(R)}$
Autovalor	2,8471	0,1045	0,0484
Proporção	0,949	0,035	0,016
Acumulado	0,949	0,984	1
Respostas	Autovetores		
$R_{a(I)}$	0,572	0,815	-0,097
$R_{a(M)}$	0,581	-0,319	0,749
$R_{a(F)}$	0,579	-0,484	-0,656

Para se obter uma resposta que explica 100% da variabilidade foi realizada a análise de componentes ponderadas. Através da Eq. 11 as componentes principais ponderadas de rugosidade ($WPC_{(R)}$) foram calculadas como uma combinação linear dos $PC1_{(R)}$, $PC2_{(R)}$, $PC3_{(R)}$ e seus respectivos autovalores.

$$WPC_{(R)} = 2,8471 \times (PC1_{(R)}) + 0,1045 \times (PC2_{(R)}) + 0,0484 \times (PC3_{(R)}) \quad (11)$$

Para que o método ANOVA seja utilizado é necessário que a variância dentro apresente igualdade e que os resíduos da variável apresentem distribuição normal. Para verificar esses requisitos, o teste de normalidade de Anderson-Darling e o teste de Bartlett para igualdade de variâncias foram realizados. A Tabela 5 apresenta os *p-values* resultantes dos testes. É possível constatar que todos os *p-values* são maiores que o nível de significância ($\alpha=0,05$), deste modo as hipóteses nulas de igualdade de variâncias e de normalidade dos resíduos não podem ser rejeitadas.

Tabela 5. *P-values* para teste de normalidade e teste de igualdade de variâncias

	$R_{a(I)}$	$R_{a(M)}$	$R_{a(F)}$	$PC1_{(R)}$	$WPC_{(R)}$
Teste de normalidade	0,487	0,140	0,098	0,795	0,814
Teste de Bartlett	0,776	0,322	0,128	0,174	0,064

O método ANOVA foi aplicado para as variáveis originais $R_{a(I)}$, $R_{a(M)}$, $R_{a(F)}$ e para os escores das componentes principais $PC1_{(R)}$ e $WPC_{(R)}$. A Tabela 6 apresenta os resultados do método para as variáveis estudadas e os respectivos *p-values*. Com os resultados obtidos é possível confirmar que a interação Peça*Operador não foi significativa para todas as variáveis, uma vez que o *p-value* da interação é maior que o nível de significância adotado ($\alpha=0,05$). Além disso, para todas as respostas, o fator peça é estatisticamente significativo e o fator operador não é significativo.

Tabela 6. ANOVA e *p-values* GR&R

Fonte de variação	$R_{a(I)}$	$R_{a(M)}$	$R_{a(F)}$	$PC1_{(R)}$	$WPC_{(R)}$
Peça	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Operador	0,902	0,160	0,353	0,319	0,333
Peça*Operador	0,851	0,103	0,893	0,514	0,505

Uma vez que a interação Peça*Operador não é estatisticamente significativa para as variáveis estudadas, o *Minitab* remove a interação e refaz a ANOVA automaticamente. A Tabela 7 apresenta a ANOVA com os *p-values* obtidos após a retirada da fonte de variação Peça*Operador. É possível perceber que há mudança nos *p-values* após a remoção da interação, porém, o fator peças ainda é significativo para todas as respostas, assim como, o fator operador não é estatisticamente significativo.

Tabela 7. ANOVA e *p-values* GR&R feito pelo *Minitab* para variáveis que não apresentaram interação peça*operador significativa

Fonte de variação	$R_{a(L)}$	$R_{a(M)}$	$R_{a(F)}$	$PC1_{(R)}$	$WPC_{(R)}$
Peças	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Operador	0,927	0,076	0,477	0,311	0,323

As componentes de variância do experimento foram calculadas através do estudo de repetibilidade e reprodutibilidade. A Tabela 8 apresenta um resumo do estudo GR&R que, considerando seis desvios-padrões, avalia a porcentagem de variação de cada componente estudada através dos desvios padrões da repetibilidade, reprodutibilidade (Operador e Peça*Operador), peças e variação total.

Tabela 8. Análise GR&R para variância

	$R_{a(L)}$	$R_{a(M)}$	$R_{a(F)}$	$PC1_{(R)}$	$WPC_{(R)}$
Fonte	% 6 σ	% 6 σ	% 6 σ	% 6 σ	% 6 σ
GR&R Total	21,00	16,76	18,38	13,30	13,28
Repetibilidade	21,00	16,09	18,38	13,23	13,23
Reprodutibilidade	0,00	4,71	0,00	1,31	1,17
Operadores	0,00	4,71	0,00	1,31	1,17
Peça-a-peça	97,77	98,58	98,3	99,11	99,11
Variação total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

É possível notar que a porcentagem de variância relacionada com a repetibilidade e a reprodutibilidade é pequena comparada com a porcentagem de variação das peças. Todos os valores %GR&R obtidos estão enquadrados na categoria marginal, ou seja, apresentam uma porcentagem na faixa de 10% a 30% da variabilidade total. Isso indica um sistema de medição apropriado considerando as condições do laboratório de metrologia.

Explorando a análise multivariada, a %GR&R para $PC1_{(R)}$ é equivalente a 13,30%. Ao utilizar o método de análise de componentes ponderadas, a %GR&R foi equivalente a 13,28%, um valor menor que o obtido para $PC1_{(R)}$, ou seja, houve uma pequena melhora na porcentagem da variabilidade total quando o método de componentes ponderadas foi utilizado, justificando seu uso para respostas de rugosidade.

A Figura 6 apresenta o gráfico de interação entre peças e operadores e o gráfico de contribuição de cada componente de variação para a resposta $WPC_{(R)}$. É possível perceber que não há interação peça*operador estatisticamente significativa, portanto, foi retirada da análise a fim de melhorar o ajuste. Além disso, constata-se que a maior contribuição da variação é relativa à componente peça.

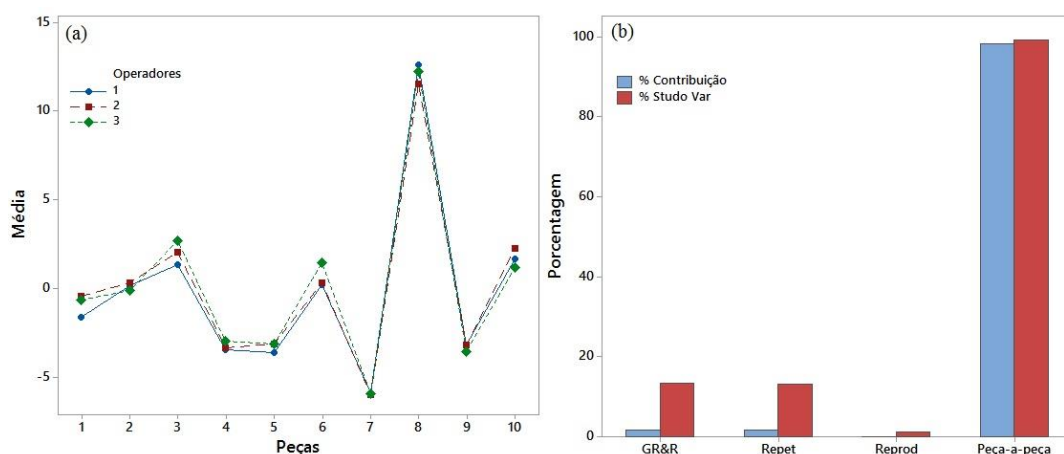


Figura 6. (a) Interação peça*operador para $WPC_{(R)}$; (b) Contribuição das componentes

A seguir, são apresentados, através da Tab. 9, os ajustes para a resposta $WPC_{(R)}$ (antes e após a retirada da interação peça*operador). É possível notar que a resposta apresentou um bom ajuste. Ainda, comprova-se que a retirada da interação peça*operador do modelo para a resposta $WPC_{(R)}$ ocasionou em uma pequena melhora no ajuste do modelo.

Tabela 9. Ajustes para as respostas $WPC_{(R)}$

Resposta	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
$WPC_{(R)}$ (com interação)	99,02%	98,08%	96,09%
$WPC_{(R)}$ (sem interação)	98,45%	98,09%	97,57%

5. CONCLUSÃO

Após a realização das medições e análises propostas foi possível avaliar o sistema de medição utilizado. Percebeu-se que o sistema de medição para a variável R_a é descrito como marginal, segundo o critério da AIAG, uma vez que a %GR&R para todas as variáveis estudadas esteve entre 10% e 30%. Nesse caso, AIAG (2010) afirma que é necessário analisar a importância da aplicação e custos para considerar sistemas marginais aceitáveis. Sendo assim, considerando a aplicação presente e seus custos, o sistema de medição é aceitável.

Além disso, foi verificou-se que a maior porcentagem de variabilidade do estudo GR&R é devido à componente peça, o que é desejável para estudos do sistema de medição, pois, com isso, confirma-se que o sistema foi capaz de medir corretamente todas as diferentes faixas de rugosidade presentes no estudo.

A utilização da análise multivariada foi possível, pois as respostas apresentaram correlação estatisticamente significativa. Com isso, através da análise de componentes principais, foi realizado um estudo simultâneo de todas as variáveis e foi possível perceber que, além de representar 100% da variabilidade total, a %GR&R através do método WPC apresentou um melhor resultado que o estudo GR&R da primeira componente principal, que explica 94,9% da variabilidade total. Sendo assim, sua utilização é justificável para o estudo GR&R através da análise multivariada por componentes principais. Por fim, nota-se também que, uma vez que o estudo GR&R não apresenta interação peça*operador significativa, a retirada da interação causa uma melhora no ajuste do modelo.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a CAPES e CNPq pelo financiamento do presente trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Al-Refaie, A.; Bata, N., 2010, "Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 43, n. 6, p. 842–851.
- Asplund, M.; Lin, J., 2016, "Evaluating the measurement capability of a wheel profile measurement system by using GR&R", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 92, n. May, p. 19–27.
- Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010, "Measurement systems analysis Reference Manual", 4 ed. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force.
- Awad, M. et al., 2009, "A Measurement System Analysis Approach for Hard-to-Repeat Events", *Quality Engineering*, v. 21, n. 3, p. 300–305.
- Deshpande, A. A. et al., 2014, "Applications of gage reproducibility & repeatability (GRR): Understanding and quantifying the effect of variations from different sources on a robust process development", *Organic Process Research and Development*, v. 18, n. 12, p. 1614–1621.
- Erdmann, T. P.; Does, R. J. M. M.; Bisgaard, S., 2009, "Quality Quandaries*: A Gage R&R Study in a Hospital", *Quality Engineering*, v. 22, n. 1, p. 46–53.
- He, S. G.; Wang, G. A.; Cook, D. F., 2011, "Multivariate measurement system analysis in multisite testing: An online technique using principal component analysis", *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 12, p. 14602–14608.
- Liao, H. C., 2006, "Multi-response optimization using weighted principal component", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, n. 7-8, p. 720-725.
- Loftus, P.; Giudice, S., 2014, "Relevance of methods and standards for the assessment of measurement system performance in a High-Value Manufacturing Industry", *Metrologia*, v. 51, n. 4, p. S219–S227.
- Mingoti, S. A., 2005, "Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada", Editora UFMG.
- Pereira, R. B. D. et al., 2016, "Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify special causes of variation", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 82, p. 135–144.
- Peruchi, R. S., 2011, "Método dos componentes principais ponderados aplicado em avaliação de sistemas de medição com grandezas correlacionadas", Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá–UNIFEI, Itajubá.
- Peruchi, R. S. et al., 2013, "A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics", *International Journal of Production Economics*, v. 144, n. 1, p. 301–315.
- Peruchi, R. S. et al., 2014, "Weighted approach for multivariate analysis of variance in measurement system analysis",

Precision Engineering, v. 38, n. 3, p. 651–658.

Rencher, Alvin C., 2002, "Methods of multivariate analysis", John Wiley & Sons. New York.

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

Wang, H. et al., 2012, "Prediction of cutting forces in helical milling process", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 58, n. 9–12, p. 849–859.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY GR&R OF ROUGHNESS' MEASUREMENTS OF HOLES OBTAINED BY HELICOIDAL MILLING INTERPOLATED IN AISI H13 HARDENED STEEL

Rafaela Aparecida Mendonça Marques, rafaelaamm@hotmail.com¹

Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufsj.edu.br¹

Fernanda Souza de Oliveira, fernandasouza.o@hotmail.com¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br²

¹Department of Mechanical Engineering, Federal University of São João del-Rei, 170 Frei Orlando Square, São João del-Rei, MG 36880-000, Brazil

²Institute of Industrial Engineering and Management, Federal University of Itajubá, 1303 BPS Avenue, Itajubá, MG 37500-903, Brazil

Abstract. *The helical milling process makes it possible to obtain finished holes in a single operation. To ensure interchangeability, the holes obtained must have a surface finishing and a geometric error within the established tolerance levels. In order to ascertain the capacity of the procedures and of the roughness measurement system, a gage repeatability and reproducibility (GR&R) study was proposed. Three operators, ten parts and a roughness measurement system were considered. The parts were selected considering different levels of geometric and microgeometric finishing, in order to determine the capacity of each operator and the measuring system to measure different levels of the scale of the instrument. Furthermore, each operator measured each part twice to evaluate the repeatability of the measurement system procedures. Since the roughness responses considered presented correlation structure statistically significant, the principal components analysis was used, allowing the evaluation of the variance - covariance structure of the responses. The results exhibited indicate non-significant part*operator interactions, a measurement system classified as marginal, and also, a better GR&R result after using the weighted principal components method. Thus, it is possible to ensure the roughness measurement of the holes obtained by the interpolated helical milling process in the hardened AISI H13 steel.*

Keywords: *GR&R, Roughness, Interpolated helical milling*