

UM GR&R EXPANDIDO PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

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

Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufs.br¹

Rafaela Mendonça Marques, rafaelaamm@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, campus Santo Antônio, CEP nº 36307-352, São João del-Rei - Minas Gerais, Brasil;

Resumo: O objetivo principal da presente pesquisa é a comparação entre dois sistemas de medição de rugosidade a partir de um GR&R expandido. O estudo convencional da repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição (Gage repeatability and reproducibility - GR&R) leva em consideração tanto operadores quanto peças como fontes de variação. Entretanto, o instrumento de medição também pode ser considerado uma fonte de erro do processo. Tratando-se da medição de rugosidade superficial de peças metálicas usinadas, existem instrumentos de medição sem contato, perfilômetros e rugosímetros portáteis. Os perfilômetros são instrumentos que podem ser utilizados para medição de perfil e rugosidade enquanto os rugosímetros portáteis são dedicados à medição de rugosidade. Com a finalidade de comparar a capacidade de medição do rugosímetro portátil e do perfilômetro, a partir da repetitividade de cada instrumento, além da estimativa do erro sistemático considerando a diferença entre médias, tais instrumentos foram considerados em um GR&R expandido. Foram consideradas nove peças, três operadores e três replicações totalizando 162 medições. Em relação à rugosidade média (R_a), pode-se observar que há uma diferença considerável na repetitividade dos instrumentos avaliados, sendo que o rugosímetro portátil apresentou maior capacidade de medição em relação ao perfilômetro.

Palavras-chave: GR&R, GR&R Expandido, Rugosidade, Erro sistemático;

1. INTRODUÇÃO

A redução da variabilidade em processos de manufatura está totalmente relacionada à obtenção da qualidade do produto final. Não obstante, esta variabilidade pode ser atribuída ao sistema de medição utilizado e não ao processo de fabricação propriamente dito, de forma que as ações para correção das não conformidades do produto não sejam efetivas (PERUCHI, R. S. *et al.*, 2014). A Análise de Sistemas de Medição (*measurement systems analysis* - MSA) constitui um conjunto de técnicas de controle de qualidade com a finalidade de reduzir a variabilidade do sistema de medição.

Segundo Van Den Heuvel e Trip (2006), para a aplicação efetiva de uma ferramenta da qualidade como o Seis Sigma ou uma certificação ISO 9000, é necessário ter um bom sistema de medição para mensurar as características da qualidade com precisão. Usualmente, os fatores que influenciam no erro sistemático de medição são peças, operadores, sistema de medição e características do ambiente de medição. A técnica da MSA mais comumente usada para avaliar a capacidade de um sistema de medição é o estudo da repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição (*Gage repeatability and reproducibility* - GR&R), que mensura erros relacionados à reprodutibilidade, que consiste na variabilidade relativa ao operador e à repetitividade, isto é, a variabilidade relativa à repetição da medição de uma peça considerando o mesmo operador. Neste estudo padrão se assume que a variabilidade total observada é expressa por $\sigma_{total}^2 = \sigma_{repetibilidade}^2 + \sigma_{reprodutividade}^2$. O procedimento estatístico utilizado para determinar as variabilidades é a ANOVA (Analyses of variance). (USAGE, 2000)

Em alguns casos, entretanto, é necessário adicionar mais algum fator de interesse ao estudo. E, quando três ou mais fatores estão incluídos na análise, trata-se de um estudo GR&R expandido. Nesta pesquisa foi realizado um GR&R expandido considerando como fator adicional o “instrumento” de medição, de forma a comparar dois sistemas de medição de rugosidade do laboratório de metrologia da UFSJ e avaliar a repetitividade destes, visto que estão diretamente ligadas a outras pesquisas desenvolvidas na academia. A diferença entre o GR&R padrão e o expandido está relacionada à permissão de inclusão de novos fatores adicionais e conseqüentemente ao número de dados a serem coletados. O GR&R expandido pode ser realizado utilizando o método ANOVA com um planejamento fatorial com mais de dois fatores. (HEUVEL, 2006)

O estudo GR&R expandido realizado visa à comparação de um rugosímetro portátil e de um perfilômetro para medição da rugosidade média (R_a) de peças usinadas de aço AISI 1045. A princípio será feita uma revisão sobre o método estatístico utilizado para a análise de sistema de medição, GR&R expandido. Na próxima seção a metodologia utilizada será descrita, especificando equipamentos, corpos de prova e características do estudo GR&R. Posteriormente,

serão apresentados os dados obtidos e as análises realizadas. Por fim, será possível tirar conclusões quanto aos sistemas de medições estudados e a capacidade de cada um.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. GR&R tradicional

Em todos os problemas com medição tem-se uma parcela decorrente do processo e outra devido ao sistema de medição utilizado. A variabilidade do produto/processo e do medidor pode ser avaliada através de estudos estatísticos, dentre eles temos como exemplo os gráficos de controle, a ANOVA (Análises de variância) e o chamado Estudo da repetitividade e da reprodutibilidade GR&R. (MONTGOMERY, 2004)

Tomando como base um procedimento de medição composto de a peças, b operadores, selecionados de forma aleatória, e um número n de replicações, o resultado da medição pode ser representado pelo modelo de efeitos disposto na Eq. (1) (onde i = peça, j =operador e k = medição):

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (1)$$

Referente à Eq. (1), os efeitos dos fatores peças, operadores e interação são dados, respectivamente, por τ_i , β_j , $(\tau\beta)_{ij}$, sendo ε_{ijk} o erro aleatório. Esse estudo usa a ANOVA para separar os componentes de variância implicando, portanto, nas estimativas de variância assim definidas pelas equações abaixo:

$$\sigma^2 = MS_{erro} \quad (2)$$

$$\sigma_{\tau\beta}^2 = \frac{MS_{pxo} - MS_{erro}}{n} \quad (3)$$

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{MS_o - MS_{pxo}}{an} \quad (4)$$

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{MS_P - MS_{pxo}}{bn} \quad (5)$$

tal que MS_{erro} , MS_P , MS_O e MS_{pxo} são as médias dos quadrados para o erro, peça, operador e a interação entre peça e operador, respectivamente. A variância relativa à repetitividade e reprodutibilidade (σ^2) é computada de acordo com a Eq. (6), na qual tem-se a soma dos componentes operador e interação entre peça e operador. A variação do sistema de medição é então a soma das componentes de repetitividade e reprodutibilidade de acordo com a Eq.(7): (Montgomery, 2005)

$$\sigma_{reprodutividade}^2 = \sigma_{\beta}^2 + \sigma_{\tau\beta}^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{GR\&R}^2 = \sigma_{reprodutividade}^2 + \sigma_{repetibilidade}^2 \quad (7)$$

Após o cálculo das componentes de variação através da ANOVA, é necessário decidir se o sistema de medição é aceitável ou não. A Fig. (1) apresenta como um sistema de medição pode ser classificado (AIAG, 2010; PERUCHI et al., 2014). O percentual de contribuição de cada componente de variação é calculado em relação à variação total.

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

Figura 1. Critério de aceitação. Fonte: AIAG, 2010; PERUCHI et al., 2013; PEREIRA et al., 2016.

2.2. GR&R expandido

Em alguns casos o estudo GR&R tradicional, baseado em um modelo fatorial para dois fatores, não obtém sucesso ao avaliar a capacidade dos Sistemas de medição. Quando o estudo tradicional não é suficiente, a forma ideal de se caracterizar a abrangência dos mesmos é o GR&R expandido.

O modelo usado para representar os efeitos aleatórios no caso específico em que se têm três fatores é o disposto na Eq. (8). (Montgomery, 2005) Tomando a peças, b operadores, k instrumentos de medição e n réplicas, temos (i = peça, j = operador, k = instrumento e l = medição):

$$Y_{ijkl} = \mu_y + P_i + O_j + T_k + (PO)_{ij} + (PT)_{ik} + (OT)_{jk} + (POT)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, a \quad j = 1, \dots, b \quad k = 1, \dots, t \quad l = 1, \dots, n$$

onde μ_y é uma constante e $P_i, O_j, T_k, (PO)_{ij}, (PT)_{ik}, (OT)_{jk}, (POT)_{ijk}$ representam os efeitos dos fatores peça, operador, instrumento e interações de segunda e terceira ordem, respectivamente, sendo ε_{ijkl} o erro aleatório. As estimativas de variância do GR&R expandido podem ser calculadas de forma análoga ao GR&R tradicional, levando em consideração que a variação relativa ao novo fator instrumento será adicionada à reprodutibilidade. As variâncias designadas por $\sigma_P^2, \sigma_O^2, \sigma_T^2, \sigma_{PO}^2, \sigma_{PT}^2, \sigma_{OT}^2, \sigma_{POT}^2$ e σ_E^2 , são obtidas através do seguinte cálculo para a ANOVA segundo a Tab. (1).

Tabela 1. ANOVA para três fatores. Fonte: Montgomery 2005.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Erro quadrático	Erro quadrado esperado
Peças (P)	$n_1 = p - 1$	S_1^2	$\theta_1 = \sigma_E^2 + r\sigma_{POT}^2 + or\sigma_{PT}^2 + tr\sigma_{PO}^2 + otr\sigma_P^2$
Operadores (O)	$n_2 = o - 1$	S_2^2	$\theta_2 = \sigma_E^2 + r\sigma_{POT}^2 + tr\sigma_{PT}^2 + pr\sigma_{PO}^2 + ptr\sigma_P^2$
Instrumentos (T)	$n_3 = t - 1$	S_3^2	$\theta_3 = \sigma_E^2 + r\sigma_{POT}^2 + pr\sigma_{PT}^2 + or\sigma_{PO}^2 + por\sigma_P^2$
PO	$n_4 = (o - 1)(p - 1)$	S_4^2	$\theta_4 = \sigma_E^2 + r\sigma_{POT}^2 + tr\sigma_{PO}^2$
PT	$n_5 = (p - 1)(t - 1)$	S_5^2	$\theta_5 = \sigma_E^2 + r\sigma_{POT}^2 + or\sigma_{PT}^2$
OT	$n_6 = (o - 1)(t - 1)$	S_6^2	$\theta_6 = \sigma_E^2 + r\sigma_{POT}^2 + pr\sigma_{OT}^2$
POT	$n_7 = (p - 1)(o - 1)(t - 1)$	S_7^2	$\theta_7 = \sigma_E^2 + r\sigma_{POT}^2$
Réplicas	$n_8 = potr(r - 1)$	S_8^2	$\theta_7 = \sigma_E^2$

A média total é calculada a partir da ANOVA da Tab. (1), segundo a Eq. (9):

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^t \sum_{l=1}^r Y_{ijkl}}{potr} ; \quad (9)$$

que se trata de uma variável aleatória normal com média μ_y e variância dada pela Eq.(10):

$$\frac{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 - (\theta_5 + \theta_6 + \theta_7)}{potr} ; \quad (10)$$

O estudo pode ser realizado com a ausência de alguns dados, assim como o GR&R padrão. Quando o modelo está balanceado, a distribuição utilizada é a qui-quadrado com n_q graus de liberdade.

2.3. Medições de rugosidade para estudos GR&R

As características da superfície das peças, como a rugosidade, mostra a qualidade do produto final. A medição da rugosidade é um componente da descrição da superfície das peças no qual encontramos, segundo a norma NBR/ISO 4287(2002), um perfil de uma superfície que é a resultante da interseção de um plano específico com a superfície real. Este perfil, comumente conhecido como perfil primário (P), pode ser separado em perfis de rugosidade (R), ondulação (W) e forma.

O processo de medição apresenta alguns estágios que contemplam a calibração do instrumento de medição, procedimentos adotados para a medição e validação dos dados. A técnica de avaliação de sistemas de medição através da rugosidade está sendo cada vez mais utilizada (COSTA *et al.*, 2005)

Alguns resultados recentes de GR&R têm trabalhado com medição de rugosidade para melhoria do sistema de medição. Um exemplo é o desenvolvimento de outro sistema de medição ótica, desenvolvido por Kuo & Huang (2013), para acessar a rugosidade superficial de filmes finos revestidos. Os resultados das medições deste novo instrumento foram avaliados por estudos GR&R de forma a checar sua precisão e adequação. Os autores concluíram que o sistema de medição desenvolvido foi aceitável, de acordo com as diretrizes da AIAG.

Um perfil de rugosidade pode ser caracterizado por diversos parâmetros. Para bem definir estes parâmetros é necessário conhecer a terminologia utilizada para caracterizar e mensurar o perfil. A norma supracitada utiliza o sistema baseado na linha média para definir os parâmetros.

A linha média corresponde à linha que divide a área do perfil em picos e vales, sendo a soma das áreas dos picos (elementos superiores à linha média) igual à soma das áreas dos vales (elementos inferiores à linha). O comprimento de avaliação (l_n) corresponde ao comprimento usado para identificar as características medidas do perfil sob avaliação. O comprimento de amostragem (l) consiste no comprimento usado para estabelecer o mesmo perfil. Um comprimento de avaliação contém um ou mais comprimentos de amostragem, sendo que a norma citada recomenda a utilização de cinco comprimentos de amostragem.

O comprimento de amostragem corresponde ao comprimento de cut-off (λ_c), consistindo portanto no filtro para atenuar comprimentos de ondas longas e obter a caracterização da rugosidade. Os comprimentos de amostragem e de avaliação devem ser escolhidos segundo o resultado esperado para os parâmetros de rugosidade medidos, de forma a filtrar corretamente as ondulações e caracterizar corretamente o perfil. De acordo com a ISO apud Mitutoyo (2010) a tab. (2) apresenta os valores recomendados segundo diferentes faixas de valores para o parâmetro R_a .

Tabela 2. Cut-off e comprimento de avaliação para R_a (Mitutoyo, 2010)

Gama de R_a (μm)	Comprimento de cut-off (λ_c) (mm)	Comprimento de avaliação (l_n) (mm)
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Os parâmetros de rugosidade, de acordo com a norma NBR/ISO 4287(2002), podem ser divididos em parâmetros de amplitude, parâmetros de espaçamento e parâmetros híbridos. Os parâmetros de amplitude são os mais importantes, sendo constantemente utilizados para descrever o acabamento de superfícies usinadas.

O parâmetro R_a que será abordado no estudo consiste num parâmetro de amplitude (pico e vale) e trata-se da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de avaliação.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi baseada em experimentos realizados no LABMETRO (Laboratório de Metrologia do departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ), com medições de rugosidade feitas em peças de Aço 1045 utilizando dois equipamentos disponíveis para a finalidade: medidor de rugosidade e perfil *Form Talysurf Intra* da Taylor Hobson® (Fig.(2a)) que possui uma unidade de deslocamento transversal de 50mm, com campo de medição de $\pm 0,5$ mm, velocidade de deslocamento de até 10mm/s, velocidade de medição de até 0,5 mm/s, apalpador do tipo indutivo com resolução de 3nm com 0,2mm de campo e o Rugosímetro *Surf tester SJ-401* da Mitutoyo (Fig.(2b)) com deslocamento transversal de 25 mm, campo de medição de $\pm 400 \mu\text{m}$, velocidade de medição de até 1mm/s e velocidade de retorno de até 2 mm/s.

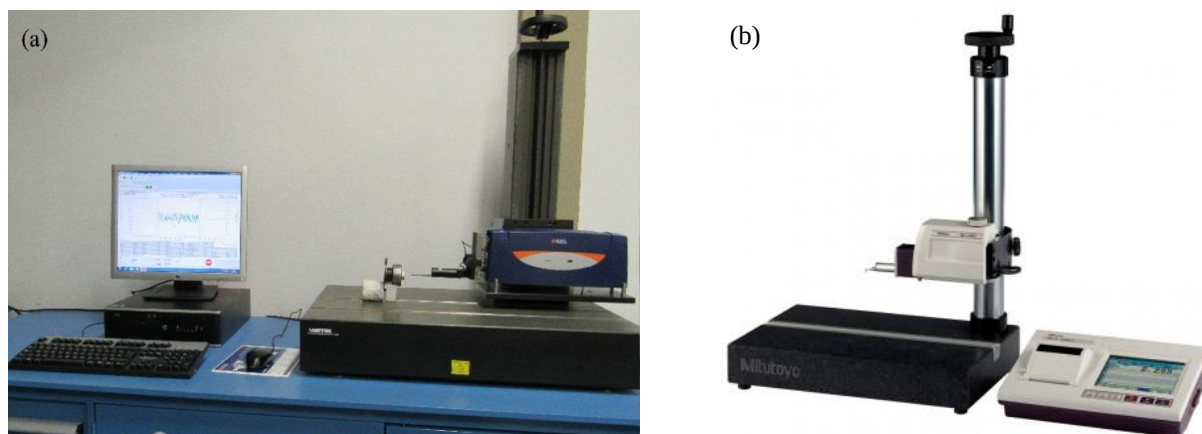


Figura 2. Equipamentos (a) medidor de rugosidade e perfil *Form Talysurf Intra* da *Taylor Hobson*®; (b) Rugosímetro *Surf tester SJ-401* da *Mitutoyo*.

As peças foram escolhidas através de análises dos resultados de outros projetos de pesquisa, para que assim fosse possível escolher peças que explorassem toda a faixa de medição dos sistemas de medição disponíveis, isto é, com níveis de rugosidade variados. As peças escolhidas, Fig. (3a), têm formato cúbico de aproximadamente 40x40 mm e foram usinadas com níveis de parâmetros de processo diferentes, de forma a obter níveis diferentes de rugosidade e avaliar a capacidade de medição em diferentes níveis de rugosidade. As medições da rugosidade foram realizadas por três operadores, com três réplicas a uma distância de 15 mm do início do corpo de prova e no mesmo sentido da usinagem destes, como representado na Fig. (3b).

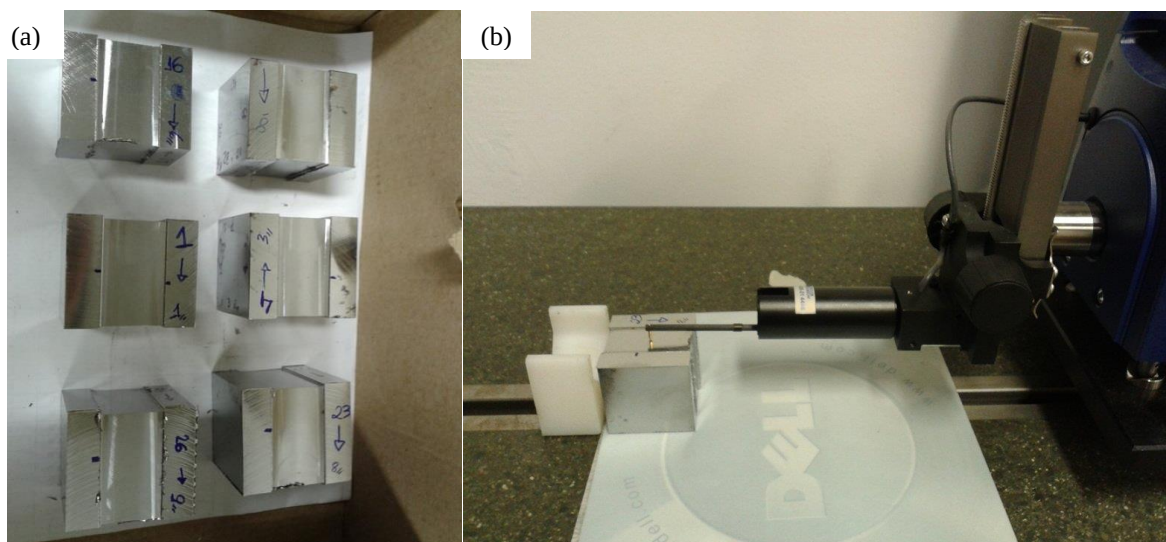


Figura 3. Medições de rugosidade (a) Peças utilizadas para medições de rugosidade; (b) Posicionamento da peça para medição.

No estudo em questão analisou-se a variável R_a , parâmetro que analisa a rugosidade média dos *cut-off*, na unidade de medida μm , e então foi realizado um GR&R expandido. O *cut-off* utilizado foi de 0,08 mm medidos cinco vezes, medidos à uma velocidade 0,05mm/s, no seu centro. A posição da peça em relação ao eixo “x” do instrumento era de 50 mm. As respostas podem ser observadas na Fig. (4) que é a interface dada pelo Perfilômetro. As medições foram realizadas através de um apalpador do tipo indutivo com resolução de 3nm com 0,2mm de campo.

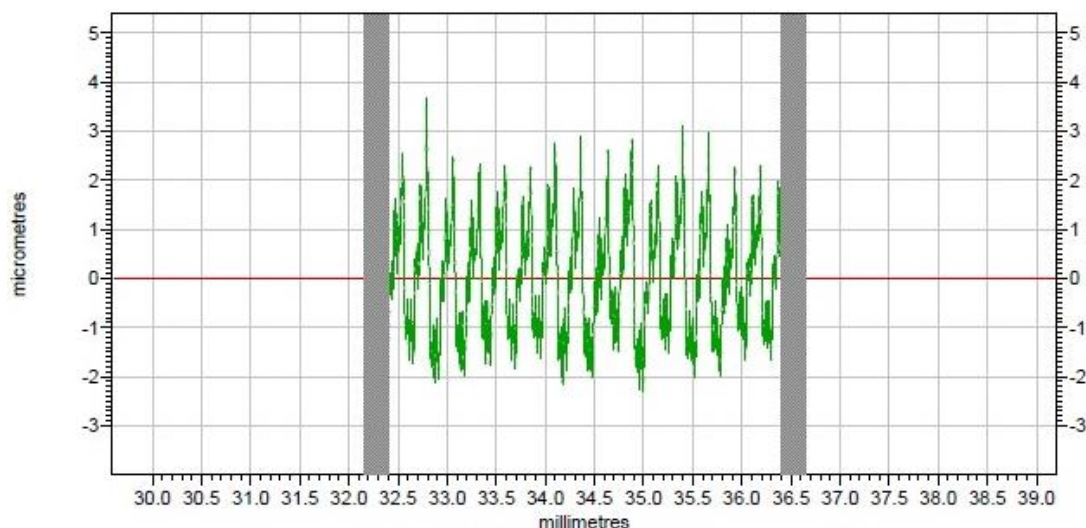


Figura 4. Respostas de medições de rugosidade no PerfilômetroTaylor Hobson para Ra com cut-off 0,08 (peça 3 – operador 1).

4. ANÁLISE E RESULTADOS

A Tabela (3) mostra os resultados obtidos para Ra no Perfilômetro e no Rugosímetro portátil. No total foram geradas 90 respostas em cada equipamento, totalizando uma massa de dados de 180 medidas Ra.

Tabela 3. - Resultados de medição para Ra

Peça	Réplica	Perfilômetro			Portátil		
		Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 1	Operador 2	Operador 3
1	1	0,85	0,86	0,80	0,85	0,86	0,80
1	2	1,05	0,86	0,86	1,05	0,86	0,86
1	3	0,86	0,88	0,88	0,86	0,88	0,88
2	1	0,53	0,53	0,49	0,53	0,53	0,49
2	2	0,50	0,53	0,55	0,50	0,53	0,55
2	3	0,54	0,54	0,88	0,54	0,54	0,88
3	1	1,00	0,98	0,97	1,00	0,98	0,97
3	2	1,03	0,99	1,02	1,03	0,99	1,02
3	3	1,21	1,01	1,04	1,21	1,01	1,04
4	1	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26
4	2	0,29	0,28	0,27	0,29	0,28	0,27
4	3	1,20	0,32	0,29	1,20	0,32	0,29
5	1	1,23	0,53	1,18	1,23	0,53	1,18
5	2	1,22	1,21	1,20	1,22	1,21	1,20
5	3	0,55	1,21	1,22	0,55	1,21	1,22
6	1	0,62	0,61	0,59	0,62	0,61	0,59
6	2	0,61	0,61	0,62	0,61	0,61	0,62
6	3	0,57	0,63	0,64	0,57	0,63	0,64
7	1	0,23	0,20	0,22	0,23	0,20	0,22
7	2	0,25	0,23	0,22	0,25	0,23	0,22
7	3	0,23	0,25	0,23	0,23	0,25	0,23
8	1	1,21	0,50	0,52	1,21	0,50	0,52
8	2	0,49	0,51	0,55	0,49	0,51	0,55

8	3	1,21	0,53	0,56	1,21	0,53	0,56
9	1	0,57	0,54	0,55	0,57	0,54	0,55
9	2	0,57	0,55	0,56	0,57	0,55	0,56
9	3	0,56	0,57	0,57	0,56	0,57	0,57

Na tabela (3), podemos notar que houve alguns pontos discrepantes (*outliers*) que podem ser justificados pela própria repetitividade do Perfilômetro, não podendo ser desconsiderados da análise por se tratar de um fator que influenciou diretamente no resultado do erro aleatório alto e instável do Perfilômetro e contribuiu para o alcance dos objetivos propostos. Vale ressaltar que o modelo gerado por esses dados é de efeitos fixos, pois não podemos extrapolar os resultados para outras peças/medidores.

O método ANOVA aplicado à resposta *Ra* com os resultados obtidos nos torna possível verificar que houve significância apenas para a diferença entre as peças, através do *P-valor* igual a 0,00. Os resultados até então obtidos indicam que a variação entre as peças é estaticamente significativa, por seu *P-valor* apresentar módulo abaixo do valor α de 0,05. Esse resultado é esperado e positivo em um estudo GR&R devido à escolha inicial de diferentes peças para a pesquisa. Os demais fatores e interações entre os mesmos apresentaram *P-valor* acima de 0,05 e, portanto, não houve diferença estatisticamente significativa. Deste modo, pode concluir que não há diferença entre os operadores e entre os instrumentos, bem como interação entre estes.

A tabela (4) traz os *P-valores* obtidos na análise de variância para três fontes de variação, incluindo *Ra* e suas interações.

Tabela 4. *P-valores*

Fonte de variação	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Rt</i>
Peças	0,000	0,003	0
Operadores	0,565	0,78	0,789
Instrumento	0,184	0,988	0,839
Peças x operadores	0,427	0,678	0,036
Peças x instrumento	0,227	0,427	0,262
Operadores x instrumento	0,186	0,048	0,099
Peças x operadores x instrumento	0,776	0,576	0,837

É importante se analisar também o número de graus de liberdade, que é um indicador do número de repetição das medições, disponível para estimar a repetibilidade do medidor. No estudo tivemos 108 graus de liberdade para a repetibilidade. Essa análise não variará para os demais parâmetros analisados, pois este é um valor fixo do estudo que depende do número de peças, operadores e instrumentos. Podemos dizer então que a estimativa da contribuição da repetibilidade do medidor na variação geral do sistema de medição não tem sua capacidade comprometida/prejudicada em nenhuma das respostas avaliadas na pesquisa.

Analisemos, portanto, a Tab. (5), que apresenta a importância relativa de cada uma das fontes de variação a partir do desvio-padrão para a rugosidade *Ra*. Podemos ver que a maior parte da variação está nas peças. A importância de cada fonte de variação pode ser notada também através do gráfico *Componentes de variação* na Fig. (5).

Tabela 5. Avaliação do medidor – *Ra*

Fonte de variação	σ^2	$\% \sigma^2$
Total GR&R	0,017941	17,51
Repetibilidade	0,016945	16,54
Reprodutividade	0,000995	0,97
Operadores	0,000038	0,04
Instrumentos	0,000957	0,93
Peça-por-peça	0,084495	82,49
Peças	0,084495	82,49
Variação total	0,102436	100

GR&R (Expandido) para Ra

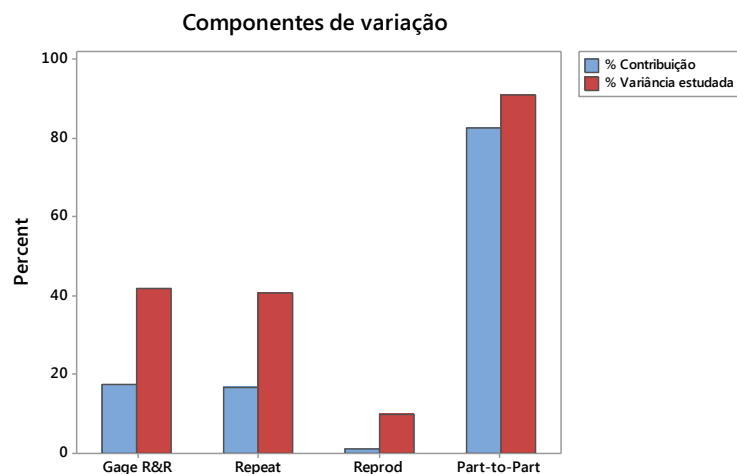


Figura 5. Gráfico das componentes de variação para Rugosidade média (Ra)

Tabela 6. Avaliação do medidor

Fonte de variação	Σ	6σ	% 6σ
Total GR&R	0,133943	0,80366	41,85
Repetibilidade	0,130174	0,781044	40,67
Reprodutividade	0,031551	0,189306	9,86
Operadores	0,006161	0,036966	1,92
Instrumentos	0,030943	0,185658	9,67
Peça-por-peça	0,29068	1,74408	90,82
Peças	0,29068	1,74408	90,82
Variação total	0,320055	1,92033	100,00

A média das leituras por operador do parâmetro *Ra* não apresenta variação entre os operadores em cada instrumento, isso pode ser visto na Fig. (5). A interação entre peça e operadores foi responsável por parte da variação observada no sistema de medição. É notável também ao analisarmos a Fig. (5), que há uma diferença entre peças e que os operadores mediram de forma homogênea as diferentes peças. Ao analisarmos a Fig. (5) onde mostra a interação *operadores x peças*, temos um comportamento comum entre os três operadores.

Como o estudo apresentou uma %GR&R elevada, foi feito um estudo GR&R padrão para cada instrumento o que apontou uma maior variação para o Perfilômetro, conforme pode-se constatar pela Tab.(7). Possivelmente a variabilidade do Perfilômetro inflou o erro experimental no GR&R expandido, de modo que a possível diferença entre as médias dos instrumentos não apareceu. De qualquer forma, fica clara a diferença entre os instrumentos. Entretanto, a diferença é em relação à variabilidade dos mesmos, o que refletiu na alta repetibilidade do Perfilômetro. A repetibilidade do portátil está em consonância com a literatura, ver PERUCHI et. al (2014).

Tabela 7. Avaliação do medidor - Ra Portátil

Fonte de variação	Portátil		Perfilômetro	
	Σ	% 6σ	σ	% 6σ
Total GR&R	0,071456	22,78	0,169589	52,39
Repetibilidade	0,071456	22,78	0,168337	52,01
Reprodutividade	0,000000	0,00	0,020564	6,35
Operadores	0,000000	0,00	0,020564	6,35
Peça-por-peça	0,305423	97,37	0,275691	85,18

Variação total	0,31367	100	0,323676	100
----------------	---------	-----	----------	-----

Podemos ver pelo resultado apresentado na Tab.(7) que o Rugosímetro portátil ficou com uma porcentagem menor que 30% e, portanto é considerado aceitável. Já o estudo para o Perfilômetro não foi aceitável, tendo além disso um erro de operadores mais alto que o portátil.

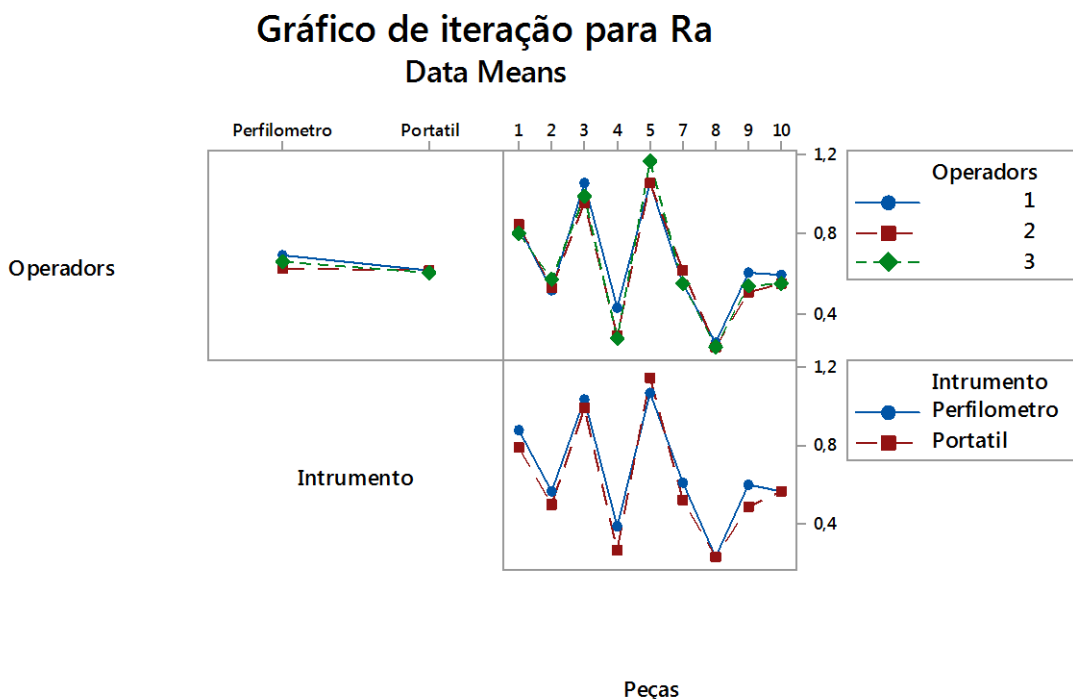


Figura 6. Gráfico de iteração entre *operadores x instrumento x peças*

5. CONCLUSÃO

Os sistemas de medições utilizados na pesquisa foram analisados após estudo desenvolvido com base nas medições e análise dos parâmetros de superfície das peças de aço, especificamente nesse caso: o parâmetro R_a . Notou-se que o estudo foi descrito como inaceitável, pois apresentou %GR&R acima de 30%. Nesse caso, AIAG (2010) afirma que, esforços devem ser direcionados para melhorar o sistema de medição. Nesse caso, um dos sistemas de medição apresenta desempenho mais satisfatório e, portanto, os dois não podem ser considerados equivalentes na precisão de medição de rugosidade.

Podemos verificar que uma boa parte da variabilidade no processo, ao tomarmos como base o GR&R expandido, se relaciona com a repetitividade, ou seja, com o erro relacionado ao sistema de medição. Isso se deu devido à precisão de cada instrumento, sendo o manual mais propício a medições com resultados variados devido ao fato de seu ajuste ser feito pelo operador. O erro referente aos operadores não se destacou na maioria das peças, mas houve alguns *out-liers* nas medições. O fato causador dessas medidas discrepantes pode estar relacionado à técnica e/ou habilidade de cada um dos três operadores e também algumas variáveis de ruídos que não podiam ser controladas dentro do laboratório. Contudo, a % referente à reprodutibilidade foi aceitável, pois teve valor menor que 10%.

Ao aplicarmos o estudo GR&R padrão para cada um dos instrumentos separados, com a mesma massa de dados, podemos notar que o perfilômetro apresentou um resultado nada satisfatório tendo um %GR&R de 52,39. Já o rugosímetro portátil demonstrou uma % GR&R de 22,78, resultado aceitável segundo AIAG (2010).

É notório que a variabilidade do perfilômetro inflou o erro experimental do estudo GR&R expandido, levando a uma alta variabilidade do R&R, classificando o procedimento de medição como inaceitável. Esse fato também dificultou a obtenção de significância nas possíveis diferenças entre instrumentos e outras fontes de variação. Assim, temos que o rugosímetro portátil considerado é mais recomendado para realizar medições de rugosidade, visto que apresentou menor variabilidade e, consequentemente, maior capacidade.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família e amigos pelo apoio durante a pesquisa. Aos coautores Daniel e Rafaela, e a ajuda essencial da Laryssa nas medições. Ao orientador Robson Bruno Dutra Pereira pela oportunidade, confiança e suporte. E nós gostaríamos de agradecer a CAPES e CNPq pelo financiamento só presente trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010, "Measurement systems analysis Reference Manual", 4 ed. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force.
- ISO, NBR.1984, N. 8404. "Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos."
- ISO, NBR. 2002. 4287 02. "Especificações geométricas de produto (GPS)–Rugosidade: Método do perfil–Termos, definições e parâmetros da rugosidade".
- KUO, C.-C.; HUANG, P.-J. 2013. "Repeatability and reproducibility study of thin film optical measurement system. Optik" - International Journal for Light and Electron Optics, v. 124, n. 18, p. 3489–3493.
- Montgomery, D. C, 2009. "Introduction to statistical quality control", Vol.6 , United States of America, p.142-148.
- Montgomery, D. C. 2005, "Desing and analisys of Gauge R&R Studies", Vol. 1, Asa Siam, Philadelphia, p. 163-167.
- Mitutoyo; 2010. "Measurement systems analysis". Vol.4, Zürich (Manual), p.
- COSTA, R. *et al.*, 2005. " Paper superficial waviness: Conception and implementation of an industrial statistical measurement system." *Analytica Chimica Acta*, v. 544, n. 1–2 SPEC. ISS., p. 135–142.
- 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.
- USAGE, I. O. G. 2000. "Decision Support for Off-line Gage Evaluation." v. 19, n. 5, p. 318–331.
- VAN DEN HEUVEL, E. R.; TRIP, A. 2006. " Evaluation of Measurement Systems with a Small Number of Observers." *Quality Engineering*, v. 15, n. 2, p. 323–331, 2006.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

AN EXPANDED GR&R FOR RUGGED MEASUREMENT CAPACITY ASSESSMENT

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

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

Rafaela Mendonça Marques, rafaelaamm@hotmail.com¹

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

Abstract: The main purpose of this research is the comparison between two roughness measurement system through an expanded GR&R. The traditional Gage repeatability and reproducibility (GR&R) takes into account only operators and parts as sources of variations. However, the measurement system may also be considered a source of error of the measurement process. In relation to roughness measurement of metallic machined parts, some of the measurement system available are profilometers and surf testers. Profilometers may be employed o measure profile and roughness, while surf testers are dedicated to roughness measurement. Aiming to compare the capability of the surf tester and the perfilometer, considering the repeatability of each instrument, besides the estimative of the systematic error, through the difference between averages, these instruments were considered in an expanded GR&R. It was considered nine parts, three operators and three replicates, totalizing 162 measurements. In relation to the average roughness (Ra), it may be observed that there are a considerable difference between the repeatability of the instruments evaluated, and the surf tester presented higher capability than the profilometer.

Keywords: GR&R, Expanded GR&R, Roughness, System error;