

## **ANÁLISE DA QUALIDADE DE UM PROCESSO DE TORNEAMENTO POR MEIO DA APLICAÇÃO DO NÍVEL DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE ENTRADA E DE SAÍDA**

Thais Fernandes Barbosa Campos (FAI) thais\_barbosa\_@hotmail.com

Nataly Carolini Ribeiro Silva (FAI) natalycarol@outlook.com

Juliana Helena Daroz Gaudêncio (FAI) julianagaudencio@fai-mg.br

### **Resumo**

Este trabalho proporciona uma aplicação das análises de regressão e correlação entre as variáveis de entrada e saída de um processo de torneamento. Para tanto, a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) foi utilizada com o propósito de encontrar modelos que apresentem efeitos significativos no processo analisado. O processo, objeto de estudo, possui três variáveis de entrada: velocidade de corte, avanço e profundidade; e sete variáveis de saída, contemplando cinco tipos de rugosidades medidas, a taxa de remoção de material e o custo de operação. Almeja-se com as análises de regressão e correlação, interpretar o processo de modo que seja possível a sua melhoria. Como resultado, é possível definir que o custo de operação é afetado de forma mais significativa pela taxa de remoção do material, ou seja, quanto mais veloz o processo for, o custo tende a ser minimizado de forma que o impacto na rugosidade – variável de qualidade – não seja tão significativo. É possível ressaltar, também, que os modelos de regressão obtidos possuem bons ajustes, proporcionando melhores previsões dos valores de funcionamento da máquina (variáveis de entrada) com um acabamento superficial da peça que seja o melhor possível.

**Palavras-Chaves: Correlação, Processo de Torneamento, Melhoria Produtiva**

### **1. Introdução**

Os avanços da tecnologia e a globalização aumentam frequentemente a velocidade das mudanças em todas as áreas da indústria. Com clientes cada vez mais exigentes, a qualidade dos produtos passou a ser um dos principais focos das empresas que buscam vantagem competitiva em relação a seus concorrentes. Kazemzadeh et al. (2008) afirma

que a oferta de produtos de qualidade não é uma tarefa fácil, uma vez que exige que os processos são preparados para otimizar simultaneamente mais de uma característica de qualidade.

Nas palavras de Dikesch e Mozzato (2004), a imposição mercadológica feita pelas diretrizes gerenciais contemporâneas (modelos de gestão sistêmicos) e pela abertura comercial que configura um ambiente nacional mais competitivo, estimula a reorganização dos parâmetros de competitividade ao estabelecer a qualidade no processo (não apenas no produto) como imperativo de continuidade dos empreendimentos de negócios.

Segundo Montgomery (2008), as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos, etc).

Assim, o presente trabalho visa analisar o nível de correlação entre as variáveis de entrada com as variáveis de saída de um processo produtivo de torneamento. Espera-se com essas informações, interpretar como a relação entre essas variáveis implicam na melhoria - qualidade - do processo.

Segundo Ferraresi (1977), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o eixo referido.

Neste trabalho, foi considerado o processo de torneamento do aço de corte fácil 12L14 que possui três variáveis de entrada: velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f_n$ ) e profundidade ( $a_p$ ). Para tanto, foram consideradas as seguintes variáveis de saída: (1) rugosidades do corpo de prova:  $R_a$  - rugosidade média aritmética,  $R_y$  - rugosidade máxima,  $R_z$  - rugosidade média,  $R_q$  - rugosidade média quadrática e  $R_t$  - rugosidade total; (2) taxa de remoção de material (MRR) e (3) custo de operação ( $K_p$ ).

## **2. Referencial teórico**

A competitividade entre as organizações no cenário atual proporciona um aumento da qualidade de seus produtos e serviços em todas as etapas do processo, desde a seleção de matéria-prima, produção e até a chegada ao consumidor final (MOURA Fo et al,

2014) . A qualidade tanto dos processos quanto do produto final é significativa para o ótimo funcionamento das organizações e, desse modo, a compreensão da relação entre as variáveis dependentes e independentes do processo são de grande importância na estratégia da alteração dos valores dos parâmetros de entrada do processo visando uma melhoria.

Neste contexto, é de grande interesse definir a relação entre as variáveis de entrada e de saída do processo de torneamento em análise. Para tal, a análise de regressão é uma ferramenta padrão utilizada na engenharia para analisar dados de experimentos, onde aplicam técnicas e lógicas matemáticas para relacionar as variáveis (Moura et al, 2015).

Hair Jr. et al. (2005) explicam que a análise de regressão talvez seja “a técnica de análise de dados mais amplamente aplicada para mensurar relações lineares entre duas ou mais variáveis”. Ainda, segundo Stevenson (1986), a regressão compreende a análise de dados amostrais para saber como duas ou mais variáveis estão relacionadas uma com a outra em uma dada população e, tem como resultado uma equação matemática que descreve esse relacionamento. A equação pode ser usada para estimar, ou prever, valores futuros de uma variável quando se conhecem ou se supõem conhecidos valores da outra variável.

## **2.1. Regressão linear múltipla**

De acordo com Fávero et al. (2009), a técnica de regressão linear múltipla pressupõe que exista uma relação linear entre uma variável  $Y$  (variável dependente) e  $k$  variáveis independentes,  $x_j$  ( $j = 1, \dots, k$ ).

Esse método de regressão descreve uma função que aborde um resultado aproximado, onde a partir dos valores das variáveis independentes, seja possível realizar uma previsão do valor da variável dependente (Moura et al, 2015).

## **2.2. Metodologia de Superfície de Resposta**

Com o propósito de analisar as interações entre as variáveis do processo, a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas úteis para a modelagem das mesmas. De acordo com Montgomery (2008), o primeiro passo da MSR é encontrar uma aproximação adequada para a relação entre as variáveis dependentes e independentes. Geralmente, emprega-se um polinômio de segunda ordem de acordo com o modelo da Equação 1:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

onde os parâmetros ( $\beta$ ) podem ser estimados utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários que visa encontrar o melhor ajuste do modelo aos dados observados.

### 2.3. Correlação entre duas variáveis

De acordo com Marques et al (2015), a análise de regressão está intimamente ligada a análise de correlação que se dedica à inferências estatísticas das medidas de associação linear que medem a “força” ou “grau” de relacionamento linear entre duas variáveis.

Para determinar a correlação entre as variáveis, o coeficiente de Pearson pode ser utilizado. De acordo com Montgomery e Runger (2003), este coeficiente mede a intensidade entre duas variáveis e, para calculá-lo, pode-se usar a seguinte equação:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

em que:  $\sigma_{xy}$  - Covariância entre as variáveis x e y;  $\sigma_x$  - Desvio Padrão da variável x; e  $\sigma_y$  - Desvio Padrão da variável y.

O Coeficiente de Pearson pode variar entre os valores de -1 a +1. Se o valor do coeficiente estiver próximo de -1, a correlação é dita negativa, caso contrário, se o coeficiente estiver próximo de +1, a correlação é dita positiva (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Marques et al (2015), com os dados para a análise de regressão e correlação simples se constrói o diagrama de dispersão. A correlação é tanto maior quanto mais os pontos se concentram, com pequenos desvios, em relação à reta.

### 3. Procedimento experimental

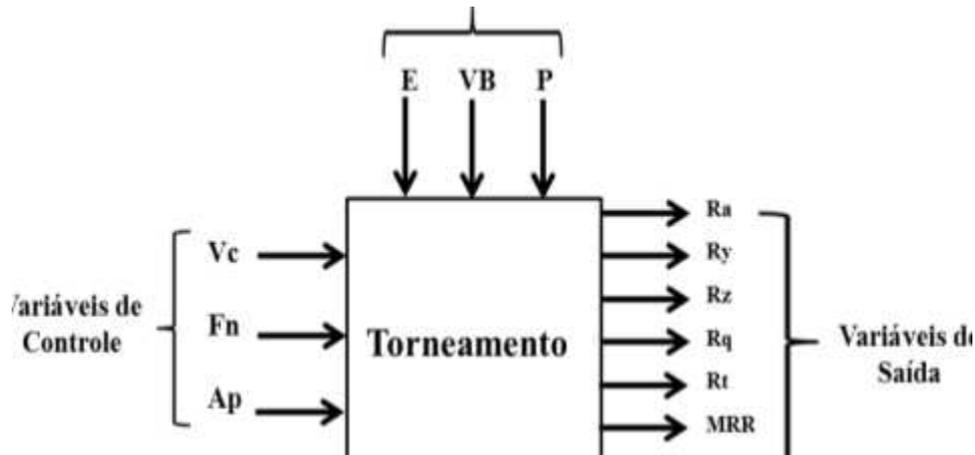
Para a realização deste trabalho, utilizaram-se os dados experimentais disponibilizados em Gaudêncio (2015) que foi baseado em um planejamento de experimentos.

Segundo Trent (2000), o torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O material a ser cortado é fixado ao mandril

de um torno e rotacionado, enquanto a ferramenta, presa firmemente em um porta-ferramenta, move-se em um plano que, idealmente, contém o eixo de rotação da peça.

O processo de torneamento do aço de corte fácil ABNT/SAE 12L14 pode ser representado através da Figura 1.

Figura 1 - Representação do processo de torneamento do aço ABNT/SAE 12L14



Fonte: Adaptado de Gaudêncio (2015)

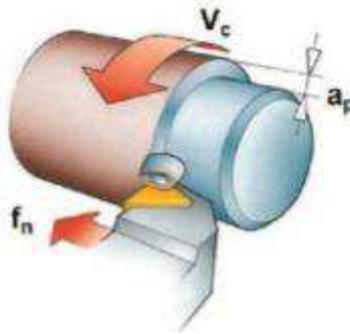
### 3.1. Variáveis de controle

Os parâmetros de usinagem, mais importantes, adotados como variáveis de controle para o processo de torneamento são, frequentemente, a velocidade de corte ( $V_c$ ), o avanço da ferramenta ( $f_n$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ) uma vez que influenciam fortemente o comportamento do processo de torneamento tanto para a obtenção de bons resultados, quanto para o acabamento superficial do produto, para o volume de material retirado e para a manutenção da vida útil da ferramenta (GAUDENCIO, 2015).

Segundo Amorim (2002), a velocidade de corte ( $V_c$ ) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min. O avanço ( $f$ ) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte ( $a_p$ ) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e  $V_c$  da ferramenta.

A Figura 2 representa cada um dos parâmetros descritos acima e selecionados como variáveis de controle do processo de torneamento.

Figura 2 - Representação das variáveis de controle do processo de torneamento



Fonte: Gaudêncio (2015)

### 3.2. Variáveis de saída

Para a composição deste experimento, foram definidas as medidas de rugosidade superficial  $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  e  $R_t$  como sendo diferentes formas de se medir a rugosidade de uma superfície. De acordo com Gaudêncio (2015), suas principais características são detalhadas a seguir:

- **Rugosidade Média Aritmética ( $R_a$ ):** É o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do comprimento de medição.
- **Rugosidade Média Quadrática ( $R_q$ ):** É o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do comprimento de medição.
- **Rugosidade Máxima ( $R_y$ ):** É o maior valor das rugosidades parciais dentre as obtidas nos diversos comprimentos de amostragem que se apresentam no comprimento de medição.
- **Rugosidade Média ( $R_z$ ):** Corresponde à média aritmética dos cinco valores das rugosidades superficiais.
- **Rugosidade Total ( $R_t$ ):** Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição, independentemente dos valores das rugosidades parciais.

Para a elaboração do trabalho, também foram consideradas duas respostas calculadas: a taxa de remoção do material (MRR) e o custo do processo de torneamento ( $K_p$ ). A taxa de remoção é obtida por meio do produto dos valores das variáveis de entrada do processo -  $V_c$ ,  $f_n$ ,  $a_p$  – enquanto que o custo é obtido por meio de uma formulação que

considera algumas variáveis, tais como: tempo de *setup*, tempo improdutivo, tamanho do lote, custo da hora máquina, preço do inserto e entre outros.

### 3.3. Materiais

Segundo Gaudêncio (2015), os corpos de prova utilizados na realização desse experimento possuem dimensões de 50 mm de diâmetro por 295 mm de comprimento para as peças consideradas grossas e 30 mm de diâmetro por 295 mm de comprimento para as peças consideradas finas. O material desses corpos de prova foi o aço de corte fácil com especificação ABNT 12L14.

Os experimentos foram realizados em um torno CNC da marca NARDINI, modelo LOGIC 175, com comando numérico CNC MCS Série 500, potência de 7,5 CV, rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm, torre porta-ferramenta com 8 posições, diâmetro máximo de 100 mm e comprimento máximo torneável de 300 mm entre pontas conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Torno CNC NARDINI



Fonte: Gaudêncio (2015)

### 3.4. Método

De acordo com Silva e Menezes (2001), é importante caracterizar e classificar uma pesquisa científica, de forma a delinear as etapas para a sua realização. Sob o ponto de vista da natureza, essa pesquisa pode ser classificada como aplicada uma vez que objetiva gerar conhecimento para fins práticos.

Sob o ponto de vista da abordagem é classificada como quantitativa, que segundo Polit, Becker e Hungler (2004) tem suas raízes no pensamento positivista lógico, tende a enfatizar o raciocínio dedutivo, as regras da lógica e os atributos mensuráveis da experiência humana.

Quanto à ótica dos objetivos, a pesquisa classifica-se como de classe axiomática normativa, pois utiliza os resultados (banco de dados) com o propósito de melhorá-los por meio de uma solução ótima explorando o uso de métodos estatísticos.

Por fim, sob a ótica dos procedimentos, essa pesquisa se enquadra no método de pesquisa denominado ‘modelagem e simulação’ uma vez que os dados analisados serão modelados por meio de procedimentos matemáticos.

#### 4. Desenvolvimento da pesquisa

A partir dos dados experimentais detalhados na Tabela 1, inicia-se a análise das sete respostas consideradas no processo.

Tabela 1 – Dados experimentais das variáveis de saída

Nº Experimento	Fatores de Controle			Variáveis de Saída						
	Vc	f	ap	Ra	Ry	Rz	Rq	Rt	KP (\$)	MRR
1	220,00	0,08	0,70	1,3562	9,2701	7,031	1,8042	9,5346	1,271	12,320
2	340,00	0,08	0,70	1,6478	10,6065	8,3306	2,0175	11,2392	1,033	19,040
3	220,00	0,12	0,70	1,7821	9,931	8,4656	2,1302	10,0781	0,988	18,480
4	340,00	0,12	0,70	1,8392	10,1453	8,7718	2,2559	10,3946	0,827	28,560
5	220,00	0,08	1,20	2,2205	14,3722	11,1836	3,8017	14,7344	1,271	21,120
6	340,00	0,08	1,20	2,1987	13,5124	11,2124	2,7035	13,8216	1,063	32,640
7	220,00	0,12	1,20	1,817	11,0306	8,9701	2,2185	11,2918	0,988	31,680
8	340,00	0,12	1,20	2,235	13,0054	10,7266	2,7173	13,353	0,834	48,960
9	180,00	0,10	0,95	1,8972	12,2925	9,8766	2,3344	13,0058	1,279	17,100
10	380,00	0,10	0,95	2,079	12,3323	10,1538	2,5158	13,3973	0,881	36,100
11	280,00	0,07	0,95	1,8462	10,6034	8,7944	2,2205	10,8394	1,204	17,653
12	280,00	0,13	0,95	1,8472	10,6533	8,9627	2,2374	10,854	0,864	35,547
13	280,00	0,10	0,53	1,6804	8,7535	7,3808	2,0463	8,9471	0,937	14,827
14	280,00	0,10	1,37	2,3014	13,5326	10,854	2,7644	13,7651	0,958	38,373
15	280,00	0,10	0,95	2,3188	12,5594	10,3492	2,7451	12,5664	0,965	26,600
16	280,00	0,10	0,95	2,2333	12,6003	10,2539	2,6656	12,7338	0,965	26,600
17	280,00	0,10	0,95	2,2571	12,7857	10,4583	2,7058	12,9958	0,965	26,600
			<b>R²</b>	93,90%	92,54%	94,35%	81,70%	91,98%		

##### 4.1. Análise do modelo de regressão

Inicialmente, com o auxílio do software Minitab®, foi realizada a regressão por meio do método dos mínimos quadrados ordinários. A análise foi realizada para as sete respostas em relação às três variáveis de entrada: Vc, fn e ap; obtendo-se os coeficientes de acordo com o conjunto de equações a seguir.

$$\begin{aligned}
R_a &= 2,27 + 0,08V_c + 0,02f_n + 0,21a_p - 0,11V_c^2 - 0,16f_n^2 - 0,11a_p^2 + 0,03V_c f_n + 0,01V_c a_p - 0,12f_n a_p \\
R_y &= 12,64 + 0,20V_c - 0,26f_n + 1,46a_p - 0,07V_c^2 - 0,67f_n^2 - 0,49a_p^2 + 0,21V_c f_n - 0,05V_c a_p - 0,51f_n a_p \\
R_z &= 10,35 + 0,28V_c - 0,04f_n + 1,12a_p - 0,11V_c^2 - 0,51f_n^2 - 0,42a_p^2 + 0,09V_c f_n + 0,02V_c a_p - 0,57f_n a_p \\
R_q &= 2,70 + 0,00V_c - 0,07f_n + 0,33a_p - 0,07V_c^2 - 0,14f_n^2 - 0,08a_p^2 + 0,19V_c f_n - 0,12V_c a_p - 0,27f_n a_p \\
R_t &= 12,76 + 0,28V_c - 0,31f_n + 1,47a_p + 0,17V_c^2 - 0,66f_n^2 - 0,48a_p^2 + 0,20V_c f_n - 0,11V_c a_p - 0,45f_n a_p \\
K_p &= 0,96 - 0,10V_c - 0,12f_n + 0,01a_p + 0,04V_c^2 + 0,03f_n^2 + 0,00a_p^2 + 0,02V_c f_n + 0,00V_c a_p + 0,00f_n a_p \\
MRR &= 26,60 + 5,68V_c + 5,32f_n + 7,00a_p + 0,00V_c^2 + 0,00f_n^2 + 0,00a_p^2 + 1,14V_c f_n + 1,50V_c a_p + 1,40f_n a_p
\end{aligned} \tag{3}$$

É possível visualizar que as equações foram geradas por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) empregando-se um polinômio de segunda ordem onde as interações entre as variáveis de entrada do processo são consideradas. Essa metodologia é aplicada com o propósito de se encontrar um melhor ajuste para os modelos. Na Tabela 2 é possível visualizar os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de cada modelo onde, também, foi realizada uma comparação entre os  $R^2$  caso os modelos fossem gerados apenas com os termos lineares das variáveis de entrada, ou seja, sem considerar a Metodologia de Superfície de Resposta proposta.

Tabela 2 – Coeficiente de Determinação –  $R^2$ 

Variável de saída	Modelo de 2ª Ordem	Modelo Linear
$R_a$	93,64%	55,50%
$R_y$	92,53%	71,60%
$R_z$	94,34%	69,17%
$R_q$	81,73%	45,42%
$R_t$	91,97%	69,23%
$K_p$	98,87%	90,50%
MRR	99,95%	97,09%

É possível notar que o  $R^2$  encontrado para o modelo linear é bem menor que encontrado para o modelo de 2ª ordem. Desse modo, comprova-se que trabalhar apenas com as

variáveis de entrada lineares ( $V_c$ ,  $f_n$ ,  $a_p$ ) na obtenção do modelo de regressão, não é possível encontrar um bom modelo de previsão. Portanto, é necessário a inserção dos termos quadráticos e das suas interações para que o modelo fique mais completo e, assim, proporcionando um melhor ajuste.

O  $R^2$  encontrado para as variáveis de saída  $K_p$  e MRR são mais elevados do que os encontrados para as rugosidades, pois tratam-se de dados calculados. Quando se utiliza dados calculados, a variância entre as variáveis é desconsiderada e, desse modo, proporcionando um elevado  $R^2$ . Isso não ocorre com as rugosidades, pois são dados medidos em laboratório onde a variância entre as medições é considerada.

#### 4.2. Análise da correlação entre duas variáveis

Após a análise de regressão e definido que os modelos gerados possuem bons ajustes, é realizada a correlação par a par entre as variáveis para que seja possível estabelecer uma relação entre elas e, de modo a definir como as suas variações acarretam em uma melhoria da qualidade do processo.

Com o auxílio do software Minitab® foi possível obter o resultado da correlação par a par entre as setes variáveis de saída conforme é apresentado na Tabela 3. O valor da primeira linha indica o valor do coeficiente de Pearson enquanto que a segunda linha indica o valor de *pvalue*.

Tabela 3 – Análise de correlação entre as variáveis de saída

	Ra	Ry	Rz	Rq	Rt	Kp
Ry	0,887 0,000					
Rz	0,941 0,000	0,977 0,000				
Rq	0,805 0,000	0,872 0,000	0,845 0,000			
Rt	0,844 0,000	0,989 0,000	0,959 0,000	0,839 0,000		
Kp	-0,268 0,299	0,066 0,802	-0,084 0,748	0,102 0,697	0,080 0,760	
MRR	0,606 0,010	0,519 0,033	0,603 0,010	0,334 0,190	0,514 0,035	-0,666 0,004

Os resultados vistos na Tabela 3 esboçam uma correlação extremamente forte entre as cinco rugosidades ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ), pois o acabamento da peça medida é a mesma. Nota-se, também, que a correlação que a variável custo ( $K_p$ ) possui em relação à taxa de

remoção de material (MRR), possui sinal negativo, ou seja, indicando que as variáveis são inversamente proporcionais. As demais correlações possuem sinal positivo, indicando que as variáveis são diretamente proporcionais.

Nesta análise, observa-se a fraca correlação existente entre o custo e as rugosidades e uma correlação moderada existente com a taxa de remoção. Desse modo, conclui-se que o custo desse processo é influenciado por MRR e não pelas rugosidades, mas essa influência ocorre de forma inversa, ou seja, com a redução do custo, a taxa de remoção tende a ser maximizada – processo mais veloz.

As Figuras a seguir representam a correlação entre as variáveis de saída ajustados de acordo com as descrições mencionadas anteriormente.

Figura 4 - Correlação fraca e inversamente proporcional entre Ra x Kp

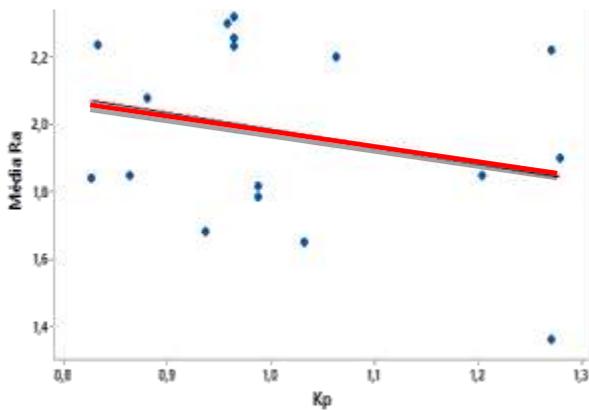


Figura 5 – Correlação fraca e diretamente proporcional entre Ry x Kp

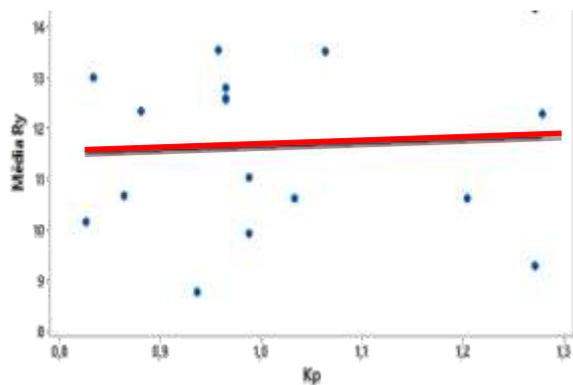


Figura 6 - Correlação fraca e inversamente proporcional entre Rz x Kp

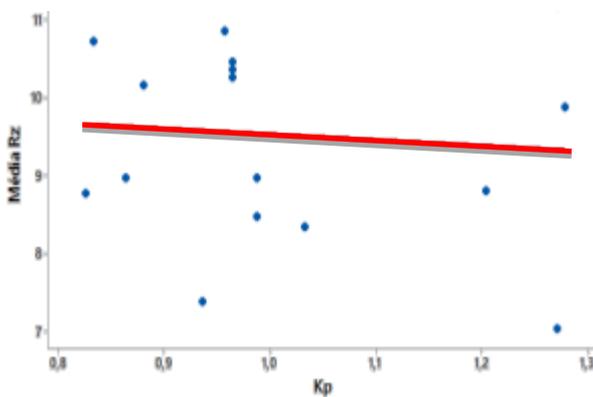


Figura 7 - Correlação fraca e diretamente proporcional entre Rq x Kp

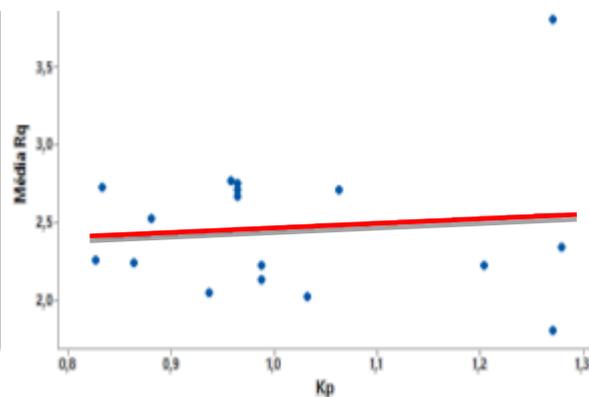


Figura 8 - Correlação fraca e diretamente proporcional entre  $R_t$  x  $K_p$

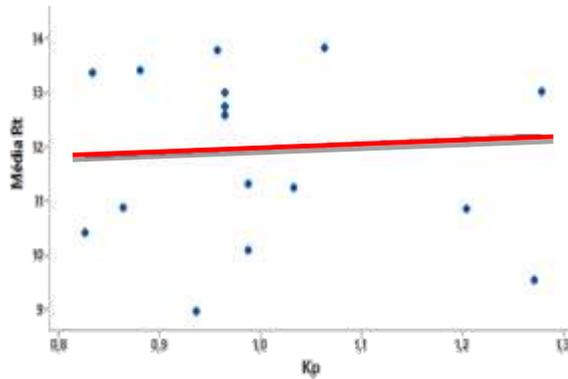


Figura 9 - Correlação fraca e diretamente proporcional entre  $R_a$  x MRR

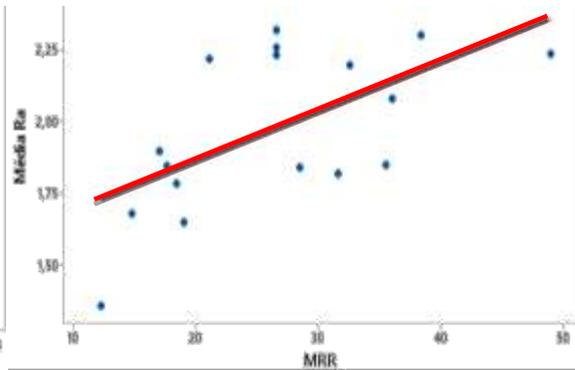


Figura 10 - Correlação fraca e diretamente proporcional entre  $R_y$  x

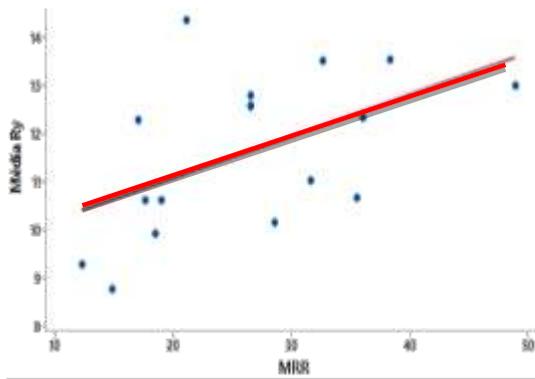


Figura 11 - Correlação fraca e diretamente proporcional entre  $R_z$  x MRR

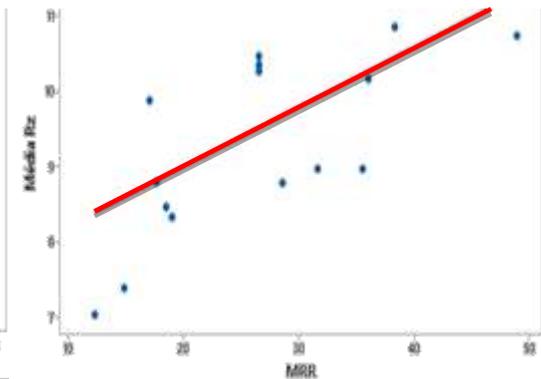


Figura 12 - Correlação fraca e diretamente proporcional entre  $R_q$  x MRR

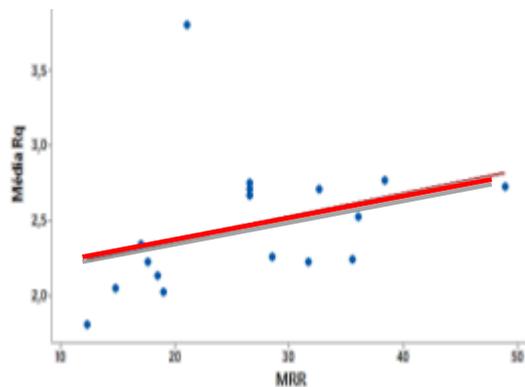
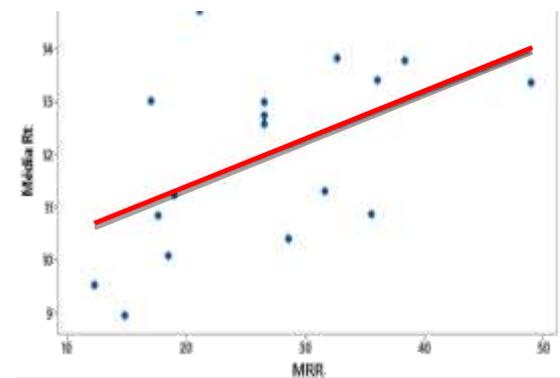


Figura 13 - Correlação fraca e diretamente proporcional entre  $R_t$  x MRR



## 5. Conclusão

Na elaboração deste trabalho foi enfatizado o valor da qualidade nos produtos, processos e serviços para atender ao mercado consumidor, cada vez mais exigente. Deste modo, foi apresentado a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) como ferramenta para se modelar dados experimentais, aplicada em um processo de usinagem – torneamento.

O presente trabalho teve um escopo exploratório através da coleta e uso de informações já publicadas e disponíveis, no sentido de fazer uma pesquisa experimental sobre regressão e correlação; e buscando identificar os graus e as direções das correlações existentes entre as variáveis de saída do processo de torneamento. As variáveis de saída consideradas, foram: cinco rugosidades medidas em laboratório – Ra, Ry, Rz, Rq, Rt – e duas respostas calculadas como a taxa de remoção de material - MRR - e o custo de operação - Kp.

A princípio, foram encontrados os modelos de regressão para as sete respostas, já mencionadas do processo. Os modelos encontrados foram modelos de segunda ordem, de acordo com a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) proposta. Os modelos obtidos para as rugosidades possuem coeficiente de determinação ( $R^2$ ) elevado, ou seja, possuem bons ajustes. Desse modo, caso seja necessário prever um valor ideal de rugosidade de modo a priorizar a qualidade exigida pelo cliente, o modelo obtido conseguiria prever um valor condizente com a realidade para os valores das variáveis de entrada – Vc, fn, ap. Assim, o processo operaria de forma que a qualidade do acabamento fosse priorizada.

Em sequência, certificando-se que os modelos de regressão encontrados satisfazem os ajustes desejados, as correlações entre as respostas foram calculadas. Como resultado da análise de correlação, conclui-se que as rugosidades entre si são altamente correlacionadas e diretamente proporcionais enquanto que o custo, em relação às rugosidades, não têm correlação alguma, tendem a zero. Com isso, a estratégia de se minimizar o custo de operação, não impactaria na melhora dos valores das rugosidades de uma forma significativa enquanto que se a taxa de remoção do material fosse alterada, haveria impacto no custo de maneira inversamente proporcional. .

Por fim, à medida que a taxa de remoção do material é aumentada, o processo torna-se mais veloz e o custo tende a ser minimizado. De certa forma, essa relação não afeta de forma significativa a rugosidade que é considerada uma variável de qualidade de acabamento da peça usinada.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio concedido a esta pesquisa.

### **Referências**

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

CAMPOS, P. H. S. et al. **Modelagem da rugosidade (ra, rt) no torneamento duro com cerâmica mista alisadora utilizando projetos de experimentos (DOE)**. Itajubá, 2011.

DIKESCH, L. E.; MOZZATO, A. R. **Gestão da produção: um estudo das indústrias do vestuário no Rio Grande do Sul**. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓSGRADUAÇÃO E PESQUISA EM ADMINISTRAÇÃO, 28., Curitiba, 2004. Anais... Rio de Janeiro: ANPAD, 2004.

FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Vol. 1, Ed. Blücher.

GAUDÊNCIO, J. H. D. **Influência dos estimadores robustos sobre a convexidade e equiespaçamento das Fronteiras de Pareto para problemas duais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2015.

HAIR JR., J.F. et al. **Fundamentos de Métodos de Pesquisa em Administração**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

KAZEMZADEH, R. B.; BASHIRI, M.; ATKINSON, A. C.; NOOROSSANA, R. A general framework for multiresponse optimization problems based on goal programming. **European Journal of Operational Research**, v. 189, n. 2, p. 421–429, 2008.

MARQUES, A. C. et al. **Uso da análise estatística para avaliar o grau de satisfação dos clientes e análise das despesas com a alimentação fora do domicílio dos consumidores: estudo de caso no natal shopping**. Natal, 2015.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. Sixth ed., Wiley, New York, 2008.

MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2rd. ed. LTC, 2003.

MOURA, A. M. et al. **Análise de conformidade com as boas práticas de fabricação em uma confeitaria em Teresina- PI**. Teresina, 2014.

MOURA, I. F. S. et al. **Avaliação a partir da análise de regressão da influência de parâmetros meteorológicos da poluição atmosférica de mp-10 em um ponto de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 2015.

OLIVEIRA, C. H. **Método da interseção normal à fronteira para a otimização multiobjetivo de superfícies de resposta duais correlacionadas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2013.

POLIT, D. F.; BECK, C. T.; HUNGLER, B. P. **Fundamentos de pesquisa em enfermagem: métodos, avaliação e utilização**. Trad. de Ana Thorell. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

SILVA, E.L. & MENEZES, E.M. **Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação**, Florianópolis: Laboratório de ensino da Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

STEVENSON, W. J. (1986). **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: Harbra, p. 341.

TRENT, M. C., Wright, P. K., 2000. **“Metal cutting principles – 4 edition”**, Butterworth-Heinemann, USA.