



REVISTA Gestão & Produção

INCENTIVANDO SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS
DISSEMINANDO CONHECIMENTO



ISSN 2594-7281

Vol. 05 (Nº 01) Ano 2021. Págs. 02-12

RELAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE TEÓRICA E REAL NO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO A FIO

RELATIONSHIP BETWEEN THEORETICAL AND ACTUAL ROUGHNESS IN FINISHING SURFACE IN THE ELECTRO EROSION PROCESS BY WIRE

Eduardo Gabriel DO VALLE¹, Douglas Miguek HESS¹, Ighor Henrique Ludvig ZAFALÃO¹, Luana Cristina ALVES¹, Álvaro Paz GRAZIANI¹, Paulo de Oliveira Junior¹, Vanderlei da SILVA¹ e Thais de Jesus Schmitt Ballmann¹.

¹Faculdade de Tecnologia SENAI Joinville, Rua Arno Waldemar Döhler, 957 – Santo Antônio - 89219-510, Joinville

Recebido: xx/xx/xxxx – Aprovado: xx/xx/xxxx

RESUMO

Com a alta demanda de usinagens cada vez mais detalhadas e técnicas, a eletroerosão auxilia na produção de peças com geometrias pequenas ou complexas, sendo dependente de um dimensional dentro das tolerâncias e um bom acabamento, assim sendo, este tipo de maquinário é capaz de oferecer esta junção. Algumas destas máquinas tem *softwares* sofisticados a ponto de apresentar por meio de parâmetros, algumas informações de como ficará a conclusão da usinagem, um destes aspectos seria a rugosidade, onde se tem uma base de como será resultado ao final do processo. Buscando trazer uma conclusão, mostrando se as informações que o *software* disponibiliza são assertivas ou não, através de estudos estatísticos e análises laboratoriais da peça finalizada. Os dados coletados serviram para análise e conclusão.

Palavras-chave: Eletroerosão a Fio; Rugosidade; Acabamento Superficial; Usinagem sem contato.

ABSTRACT

With the high demand for increasingly detailed and technical machining, EDM helps in the production of parts with small or complex geometries, being dependent on a dimensional within tolerances and a good finish, therefore, this type of machinery is capable of offering this joint. Some of these machines have sophisticated software to the point of presenting, through parameters, some information on how the conclusion will be of machining, one of these aspects would be the roughness, where you have a base of how it will be the result at the end of the process. Seeking to bring a conclusion, showing whether the information that the software provides is assertive or no, through statistical studies and laboratory analysis of the finished piece. The collected data served for analysis and conclusion.

Keywords: Wire EDM; Roughness; Surface Finish; contactless machining.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, dentre os processos de fabricação, os processos de corte por eletroerosão são usados regularmente devido aos seus resultados inerentes a precisão, agilidade e bom acabamento, trata-se de uma ótima opção a ser utilizada. Por diversas vezes, durante a confecção componentes usinados, não é possível utilizar apenas um equipamento para todos os processos necessários acerca da confecção do componente, então existe a necessidade de uma intercambiabilidade entre equipamentos durante todo o processo construtivo do componente final. Grande parte dos maquinários utilizados na atualidade é composto basicamente por máquinas que utilizam da remoção de material, não sendo diferente da eletroerosão a fio. Porém, neste processo, o equipamento trabalha removendo material através da descarga elétrica gerada pela potência enviada ao filete que, por sua vez, acaba removendo material sem contato direto com a peça, tal fato acaba gerando uma superfície final relativamente “melhor” que processos convencionais de usinagem por contato físico (entre ferramenta e material).

Visualmente podemos destacar que este tipo de usinagem é basicamente um corte por eletricidade, ao ver a máquina trabalhando, se torna possível visualizar o fio em constante movimento e ocasionando o corte do material já com sua geometria final. Para que este processo seja realizado, precisamos garantir que nosso material seja condutor elétrico, ou seja, tal processo é limitado apenas a materiais metálicos, portanto não realiza usinagem de polímeros e cerâmicas. Além dessa característica bastante importante, podemos destacar também que outros fatores importantes são: o avanço, potência e o tipo de fio utilizado, mas tudo irá depender da precisão e acabamento necessário, visando a otimização do tempo de usinagem assim como seu custo-benefício.

Este experimento tem por objetivos analisar a eficácia do aumento do número de passes de acabamento dentro do processo de usinagem por eletroerosão a fio, serão utilizados dois tipos de materiais diferentes (alumínio e aço SAE 1020). Métodos estatísticos são inseridos aos processos industriais de forma a garantir qualidade dos produtos e aplicação eficiente de princípios científicos (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

A busca por melhorias na qualidade objetiva-se por redução de variabilidade de processo. Barbeta, Reis e Borna (2010) afirmam que a variabilidade pode ser reduzida investindo em equipamentos, pessoas e tecnologia. Portanto, o parâmetro de análise a ser alterado será a quantidade de passes para acabamento, o resultado avaliado para conferir a eficácia do processo será a variação de rugosidade de acordo com a alteração de passes, outro ponto que será analisado é a exatidão entre a rugosidade teórica gerada pelo *software* da máquina e a rugosidade real coletada após o processo de usinagem.

2. METODOLOGIA

O experimento terá como processo de usinagem escolhido a eletroerosão a fio. Trata-se de um processo

caracterizado pela remoção de material, através de constantes descargas elétricas altamente controladas, entre uma peça e um eletrodo/fio. Para que haja estas descargas elétricas, ambos os pólos (peça e fio) devem estar submersos em um líquido dielétrico, comumente conhecido EDM (Electrical Discharge Machining). Este processo foi escolhido por possibilitar um bom acabamento com precisão, sem afetar significativamente a estrutura da peça, como os demais processos de usinagem.

Como já mencionado anteriormente, o processo a ser abordado neste experimento será a usinagem por eletroerosão a fio, o modelo da máquina utilizada será a CUT E 350 (GF Machining Solutions). O equipamento conta com a possibilidade de trabalhar com uma gama variada de filamento de corte, para o caso em questão será utilizado o fio AC Brass 900, o mesmo possui 0,25 mm de diâmetro que tem capacidade para suportar uma tensão tracionadora de 900 N/mm². Abaixo temos a imagem da bobina de fio utilizada neste tipo de usinagem, ele é o responsável por conduzir a corrente elétrica da máquina e gerar o arco voltaico responsável pela retirada de material, para que não ocorra o rompimento do mesmo, os parâmetros devem estar de acordo com os solicitados pelo fabricante assim como o exigido para cada tipo de material.



Figura 01 - Modelo de fio AC Brass 900 (0,25mm)

Para a execução da usinagem, é necessário abastecer o *software* do equipamento com os seguintes dados: tipo de material, modelo do filamento, quantidade de passes e o formato em si do componente final (pode ser fornecido via arquivo ou criado diretamente no *software*).

Abaixo tem-se a imagem do equipamento utilizado neste experimento:



Figura 02 - Eletroerosão a Fio

O intuito do experimento é mensurar o impacto gerado pela alteração da quantidade de passe para acabamento em um mesmo tipo de material e, como o *software* do equipamento gera uma rugosidade (Ra) teórica de acordo com os parâmetros pré-estabelecidos para a usinagem, também será possível verificar as divergências entre os valores de rugosidade teórica versus rugosidade real. Tendo em mente tais informações, o resultado esperado ao fim do projeto é mensurar o quão exato o processo se apresenta baseado nos dados teóricos.

Para inibir ou minimizar desvios externos ao processo nesses resultados, todas as amostras foram usinadas pelo mesmo operador, utilizando o mesmo lote de filamento e com corpos de provas padronizados. Com objetivo de atingir uma perspectiva imparcial do resultado com relação a materiais, o experimento será executado com dois tipos de materiais paralelamente, por terem características distintas, não será possível comparar os resultados entre si, porém irá auxiliar durante a formulação dos resultados e conclusões referente ao comparativo da rugosidade teórica fornecida pelo *software* e a real constatada através de ensaios posteriores ao processo de usinagem.

Os materiais escolhidos para a execução do processo são compostos de alumínio e o aço SAE 1020, na tabela a seguir será possível observar uma visão global referente aos corpos de provas que serão estudados, relacionando-os com seu tipo de material e quantidade de passes que serão executados durante a usinagem de tais corpos de prova, outro fator relacionada com eles, trata-se da rugosidade teórica para cada corpo de prova, tais valores são fornecidos automaticamente pelo *software* do equipamento que considera as informações de parâmetro fornecidos pelo usuário no *preset* do equipamento em questão.

Material	Prova	Passes	Ra Teórica
Alumínio	1	1	3,00
	2	2	1,70
	3	4	0,33
Aço SAE 1020	1	1	3,00
	2	2	1,49
	3	4	0,60

Figura 03 - Tabela de corpos de prova

Como é possível observar acima, serão usinados 03 corpos de prova para cada material, cada um já terá sua rugosidade teórica pré-definida de acordo com os dados fornecidos ao sistema da máquina de eletro erosão. Corpos de prova de número 1, será obtido apenas com um único passe, responsável pelo corte do mesmo na geometria em questão, já as provas de número 2, terão este corte inicial e mais um passe de acabamento, seguindo esta lógica a diferença dos corpos de prova de número 3, será que esses contaram com três passes de acabamento após terem passado pelo corte inicial.

O objetivo desta sistemática de variação na quantidade de passes, é mensurar o quão eficaz e viável será a execução desta alteração de parâmetros, ou seja, qual o custo benefício de acrescentar tempo de usinagem com passes extras, se realmente peças com maior número de passes para acabamento, apresentam uma rugosidade final melhor que as demais. Além disto espera-se verificar se a quantidade de passes influencia na exatidão da rugosidade teórica fornecida pelo software.

Logo abaixo tem-se a imagem dos corpos de provas que serão utilizados para a coleta de dados inerente a rugosidade real:

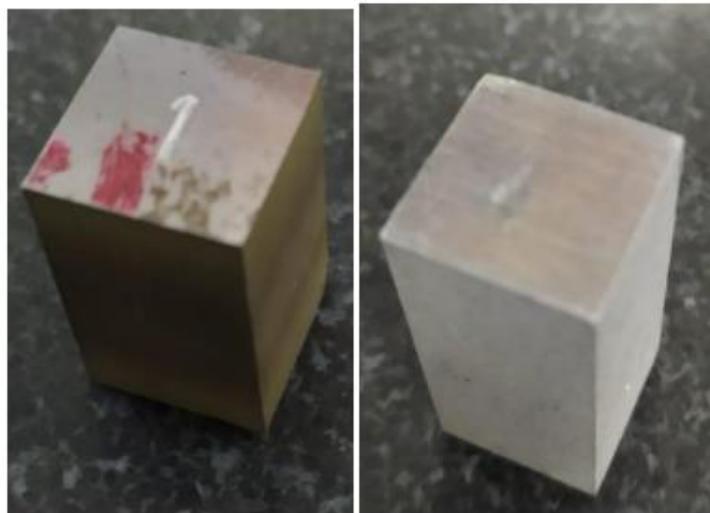


Figura 04 - Corpos de Prova, SAE 1020 (esquerda) e alumínio (direita)

Com o processo de confecção dos corpos de provas finalizado, iniciou-se o processo de obtenção das rugosidades de cada corpo de prova individualmente. Com o objetivo de trazer resultados confiáveis, o equipamento de medição utilizado (rugosímetro) foi calibrado através do bloco padrão para o equipamento, outro ponto importante para esta confiabilidade foi a padronização do sistema de medição para todos os corpos de prova. Por padrão, cada corpo de prova terá 03 regiões de uma das faces (escolhida aleatoriamente), que passaram pela coleta dos dados de rugosidade, posteriormente será gerada uma média dos valores de cada prova. O aparelho foi configurado para executar coletas no padrão Ra, com um *cutoff* de 0,8 e uma amostragem de 05 vezes o valor do *cutoff*, tais valores são padronizados de acordo com o tipo de processo utilizado na confecção dos corpos de provas.

Primeiramente foram executadas as coletas de rugosidade dos corpos de provas constituídos por alumínio, abaixo tem-se a relação dos 03 resultados obtidos para cada corpo de provas, com estes valores foi possível obter a média aritmética de cada um deles.

Corpo de Prova 01			Corpo de Prova 02			Corpo de Prova 03		
4,577	4,731	4,685	2,186	2,304	2,287	0,426	0,401	0,488
média CP1		4,6643	média CP2		2,2590	média CP3		0,4383

Figura 05 - Rugosidade Corpos de Prova Alumínio

Posteriormente foram executadas as coletas nos corpos de prova de SAE 1020, seguindo o mesmo padrão de coleta adotado anteriormente. Abaixo temos os resultados obtidos:

Corpo de Prova 01			Corpo de Prova 02			Corpo de Prova 03		
3,167	3,368	2,998	1,498	1,629	1,597	0,319	0,271	0,335
média CP1		3,1777	média CP2		1,5747	média CP3		0,3083

Figura 06 - Rugosidade Corpos de Prova SAE 1020

Com os dados coletados, o último passo do experimento, foi o processamento dos dados obtidos durante todo o estudo de caso, o método escolhido para tal processamento foi através da estatística, mais precisamente através da análise no MINITAB (*software* de processamento estatístico). Através do abastecimento do sistema com os dados utilizados e coletados durante todo o experimento, o mesmo executa o processamento das informações e gera uma análise de confiabilidade do processo, como um todo inerente a rugosidade teoria versus rugosidade real, obtida através da usinagem dos corpos de prova. Lembrando que os dados foram analisados separadamente,

quanto a seu tipo de material (alumínio e aço).

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Objetivando o melhor dos resultados, e para melhor visualização das amostras, podemos destacar cada amostra, de cada material, estabelecendo uma relação de quantidade de passes, velocidade de corte e a rugosidade teórica fornecida pela própria máquina, abaixo mostra um comparativo entre esta rugosidade teórica com a rugosidade coletada através do rugosímetro.

Logo a seguir tem-se estas relações inerentes ao material aço SAE 1020:

AÇO 1020			
PASSES	VELOCIDADE DE CORTE	RUGOSIDADE TEÓRICA	RUGOSIDADE REAL
1	7,04	3	3,167
1	7,04	3	3,368
1	7,04	3	2,998
2	3,96	1,79	1,498
2	3,96	1,79	1,629
2	3,96	1,79	1,597
4	1,7	0,6	0,319
4	1,7	0,6	0,271
4	1,7	0,6	0,335

Figura 07 - Amostragem dos dados obtidos do aço 1020

Abaixo está a mesma relação, porém desta vez, inerente aos corpos de prova composto por alumínio, tal distinção entre tabelas se fez necessário devido aos parâmetros de usinagem padrões para cada tipo de material.

ALUMÍNIO			
PASSES	VELOCIDADE DE CORTE	RUGOSIDADE TEÓRICA	RUGOSIDADE REAL
1	5,35	3	4,577
1	5,35	3	4,731
1	5,35	3	4,685
2	3,2	1,7	2,186
2	3,2	1,7	2,304
2	3,2	1,7	2,287
4	1,25	0,33	0,426
4	1,25	0,33	0,401
4	1,25	0,33	0,488

Figura 08 - Amostragem dos dados obtidos do alumínio

Por meio das imagens, destacamos que cada análise foi testada 3 vezes, para uma maior confiabilidade e comprovação do experimento. Para cada quantidade de passes, a uma diferente velocidade de corte da máquina, que em junção, nos proporcionam a rugosidade teórica, ou seja, a própria máquina nos dá um resultado, para cada combinação de parâmetros. Procurando por meios que comprovem estatisticamente se há ou não diferença entre a rugosidade teórica (dada pela máquina) e a rugosidade real (medida pelo rugosímetro), foi optado por utilizar testes de hipóteses, que mostrassem esse resultado.

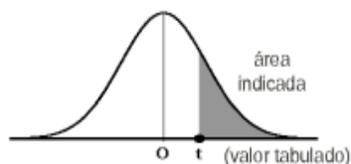
Colocando em prática, através do *software Minitab*, utilizando a função “teste t pareado”, que realiza o cálculo da probabilidade de uma amostra ser igual ou diferente de um valor determinado (DRUMOND; WERKEMA; AGUIAR, 1996). No caso para duas amostras dependentes, ou seja, uma amostra que se trata de um mesmo estudo, mas em momentos diferentes, é calculado a diferença entre as médias dos resultados de cada momento, logo depois, dividindo pelo desvio padrão, que divide pela raiz quadrada do número de termos, resultando no valor de t.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

Figura 09 - Fórmula para valor t

Para validação de uma das hipóteses H₀ (hipótese nula), indica que não há diferença significativa entre as amostras, e H₁ (hipótese alternativa), indica que há diferença significativa entre as amostras, utilizamos o “valor p”, que pode ser encontrado por meio da tabela “*t student*”(DEVORE, 2006).

Distribuição *t* de Student



gl	Área na cauda superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

Figura 10 - Tabela referência para t student

Após o entendimento de como o método funciona, os resultados se mostraram presentes através da plataforma.

Teste

Hipótese nula H_0 : diferença_μ = 0
 Hipótese alternativa H_1 : diferença_μ ≠ 0

Valor-T	Valor-p
-1,66	0,239

Figura 11 - 1 passe, aço

Teste

Hipótese nula	$H_0: \text{diferença}_\mu = 0$
Hipótese alternativa	$H_1: \text{diferença}_\mu \neq 0$
<u>Valor-T</u>	<u>Valor-p</u>
5,46	0,032

Figura 12 - 2 passes, aço

Teste

Hipótese nula	$H_0: \text{diferença}_\mu = 0$
Hipótese alternativa	$H_1: \text{diferença}_\mu \neq 0$
<u>Valor-T</u>	<u>Valor-p</u>
15,17	0,004

Figura 13 - 4 passes, aço

Como pode ser observado os resultados do aço 1020, mostraram que apenas a peça de 1 passe teve sua rugosidade real considerada igual a rugosidade teórica. Entretanto, as peças com mais passes fugiram dessa igualdade, tendo uma diferença significativa. Isso se confirma com 95% de certeza, pois o coeficiente de confiança, nosso “alpha” sendo igual a 0,05, é maior que o “valor p” das peças que obtiveram rugosidade diferente e menor que a peça que teve rugosidade igual.

Teste

Hipótese nula	$H_0: \text{diferença}_\mu = 0$
Hipótese alternativa	$H_1: \text{diferença}_\mu \neq 0$
<u>Valor-T</u>	<u>Valor-p</u>
-36,47	0,001

Figura 14 - 1 passe, alumínio

Teste

Hipótese nula	$H_0: \text{diferença}_\mu = 0$
Hipótese alternativa	$H_1: \text{diferença}_\mu \neq 0$
<u>Valor-T</u>	<u>Valor-p</u>
-15,18	0,004

Figura 15 - 2 passes, alumínio

Teste

Hipótese nula	$H_0: \text{diferença}_\mu = 0$
Hipótese alternativa	$H_1: \text{diferença}_\mu \neq 0$
<u>Valor-T</u>	<u>Valor-p</u>
-4,19	0,053

Figura 16 - 4 passes, alumínio

Observando os resultados do alumínio, podemos perceber que com maior número de passes, podemos afirmar com 95% de certeza, que a rugosidade real é igual a rugosidade teórica, já as peças com menor número de passes, podemos afirmar que são diferentes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos realizados e nos testes práticos realizados, podemos concluir que a eletroerosão a fio, máquina com alta precisão dimensional, não transmite uma real rugosidade da peça, mesmo que possa parecer próximo dos valores. A confirmação por meio dos cálculos estatísticos, provou que há diferença estatística entre as médias testadas. Tendo por objetivo trazer uma relação entre a rugosidade estabelecida na máquina e a obtida por meio da medição do rugosímetro, desde o início do artigo se pode fazer uma análise clara e específica do objetivo, mostrando as igualdades e diferenças, da teoria com a prática.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBETTA, P.; REIS, M.; BORNIA, A. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

DEVORE, Jay L. **Probabilidade e Estatística**: para Engenharia e Ciência. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

DRUMOND, F.B.; WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. **Análise da Variância**: comparação de várias situações. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2003.