

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIÓGENES OLIVEIRA DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES ERODIDAS UTILIZANDO  
A ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE 3D.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(Tcc2 - 18)

CURITIBA

2015

DIÓGENES OLIVEIRA DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES ERODIDAS UTILIZANDO  
A ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE 3D.**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Profº. Me Pedro Luiz Fiad do Amaral

CURITIBA

2015

## **TERMO DE ENCAMINHAMENTO**

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES ERODIDAS UTILIZANDO A ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE 3D.”, realizada pelo aluno Diógenes Oliveira de Souza, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Pedro Luiz Fiad do Amaral  
UTFPR - Damec

Curitiba, 04 de março de 2015.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES ERODIDAS UTILIZANDO A ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE 3D", realizado pelo aluno Diógenes Oliveira de Souza, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Me. Pedro Luiz Fiad do Amaral

Fabricação, UTFPR

Orientador

Prof.Dr. Aloísio José Schuitek

Fabricação, UTFPR

Avaliador

Prof. Esp. Maro Roger Guerios

Fabricação, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 04 de março de 2015.

## RESUMO

SOUZA, Diógenes. Caracterização de superfícies erodidas utilizando a análise dos parâmetros de rugosidade 3D. 2015. Monografia (Graduação de Engenharia Mecânica) - Departamento de Mecânica (DAMEC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015

O processo de eletroerosão ou EDM (*Electrical Discharge Machining*) possui grande aplicabilidade em situações de usinagem de materiais com alta dureza e resistência a abrasão e peças cuja complexidade dificulta a usinagem em máquinas convencionais como tornos mecânicos e fresadoras. O processo abordado é o processo de eletroerosão por penetração realizado em uma máquina IBH - Hidromatic 50A. O trabalho consiste em analisar a rugosidade das superfícies erodidas através da medição de três parâmetros de rugosidade 3D:  $S_q$  (valor médio quadrático dos pontos analisados na área de amostragem),  $S_{dq}$  (raiz quadrática média da inclinação da superfície dentro da área de amostragem) e  $S_{ds}$  (número de picos por unidade de área) – todos avaliados por interferometria óptica. A meta é verificar a influência dos seguintes parâmetros de entrada de EDM: tempo de onda ligado ( $T_{on}$ ), o tempo de onda desligado ( $T_{off}$ ), corrente de descarga, que estão diretamente ligados à energia de descarga e na qualidade do acabamento superficial obtido. A partir das medições das rugosidades é determinado o parâmetro de banda ( $\alpha$ ) que é dependente do processo de obtenção da superfície e das condições de trabalho utilizadas. O eletrodo utilizado é de cobre eletrolítico e o material que foi submetido à experimentação é o aço AISI D6 (VC 131). A escolha do material se justifica devido à grande aplicabilidade que o mesmo tem na confecção de estampas de corte e moldes para fabricação de peças plásticas, possuindo assim as características ideais para a utilização do processo de usinagem por eletroerosão.

**Palavras-chave:** usinagem por eletroerosão; parâmetros de rugosidade 3D; parâmetro de banda  $\alpha$ .

## ABSTRACT

SOUZA, Diógenes. Caracterização de superfícies erodidas utilizando a análise dos parâmetros de rugosidade 3D. 2014. Monografia (Graduação de Engenharia Mecânica) - Departamento de Mecânica (DAMEC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014

The process of EDM or EDM (Electrical Discharge Machining) has wide applicability in materials machining situations with high hardness and resistance to abrasion and parts whose complexity makes it difficult to machining in conventional machines such as lathes and milling machines. The process is approached the EDM process for penetration performed in a IBH machine - 50A Hydro-matic. The work is to analyze the roughness of surfaces eroded by measuring three 3D roughness parameters: Sq (root mean square value of the points discussed in the sampling area), SDQ (root mean square of the surface slope within the sampling area) and SDS (number of peaks per unit area) - all evaluated by optical interferometry. The goal is to verify the influence of the following EDM input parameters: Wave on time (Ton), the wave off time (Toff), discharge current, which are directly linked to energy discharge and quality of surface finish obtained. From the measurements of the roughness is determined bandwidth parameter ( $\alpha$ ) which is dependent on the process for obtaining the surface and the working conditions used. The electrode used is electrolytic copper and the material was subjected to experimentation is the steel AISI D6 (VC 131). The choice of material is justified because of the wide applicability that it is cut in the manufacture of dies and molds for the production of plastic parts, thus having the optimum characteristics for the use of electro-discharge machining process.

**Keywords:** Electrical Discharge Machining (EDM); roughness parameters 3D; bandwidth parameter  $\alpha$ .

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de eletroerosão por penetração .....	14
Figura 2 - Processo de eletroerosão a fio .....	15
Figura 3 - Fenômenos físicos relacionados o processo de descarga na eletroerosão.....	17
Figura 4 - Procedimentos: adequados de lavagem.....	23
Figura 5 - Comparação entre procedimento de limpeza correto e inadequado.	24
Figura 6 - Perfil de superfície segundo norma ISO 4287 .....	26
Figura 7 - Microfissuras na superfície do metal duro.....	27
Figura 8 - Rugosidade Ra.....	29
Figura 9 - Máquina utilizada no procedimento experimental .....	33
Figura 10 - Placa de 3 castanhas utilizada para fixação das peças .....	34
Figura 11 - Politriz utilizada na atividade experimental .....	35
Figura 12 - Montagem experimental .....	36
Figura 13 - Rugosímetro 3D - Taylor Hobson CCI MP .....	36
Figura 14 - Disposição das amostras (AISI - D6) .....	37
Figura 15 - Superfícies geradas no perfilômetro 3D: a) amostra; b) eletrodo. ...	38
Figura 16 - Variação de Sa em torno da média (amostra) .....	39
Figura 17 - Variação de Sq em torno da média (amostra).....	40
Figura 18 - Relação entre Sa e Sq (amostra).....	40
Figura 19 - Variação de Sdq em torno da média (amostra).....	41
Figura 20 - Variação de Sds em torno da média (amostra).....	41
Figura 21 - Variação de Sa em torno da média (eletrodo) .....	43
Figura 22 - Variação de Sq em torno da média (eletrodo) .....	43
Figura 23 - Relação entre Sa e Sq (eletrodo).....	44
Figura 24 - Variação de Sdq em torno da média (eletrodo).....	45
Figura 25 - Variação de Sds em torno da média (eletrodo).....	45
Figura 26 - Momentos espectrais em função da corrente .....	46
Figura 28 - Valores médios de $\alpha$ para o eletrodo .....	47
Figura 27 - Valores médios de $\alpha$ para a amostra .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: - Propriedades físicas do cobre e do grafite .....	24
Tabela 2 : Valores do parâmetro alfa para superfícies retificadas.....	31
Tabela 3: - Composição química do aço AISI D6.....	34
Tabela 4: Parâmetros de controle utilizados na usinagem da amostra .....	37
Tabela 5: Parâmetros de rugosidade médios e $\alpha$ médios para a amostra .....	39
Tabela 6: Valores médios para os parâmetros de rugosidade e alfa (eletrodo)	42
Tabela 7: Momentos espectrais médios e $\alpha$ médios (amostra) .....	46
Tabela 8: Parâmetros de rugosidade - Grupo 1 .....	54
Tabela 9: Parâmetros de rugosidade - Grupo 2 .....	54
Tabela 10: Parâmetros de rugosidade - Grupo 3 .....	55
Tabela 11: Parâmetros de rugosidade - Grupo 4 .....	55
Tabela 12: Parâmetros de rugosidade - Grupo 5 .....	56
Tabela 13: Parâmetros de rugosidade - Eletrodo.....	57
Tabela 14: Momentos espectrais e alfa ( $\alpha$ ) para a amostra .....	58
Tabela 15: Momentos espectrais e alfa ( $\alpha$ ) para o eletrodo. ....	59



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Contexto do Tema.....	11
1.2 Caracterização do Problema.....	12
1.3 Objetivo Geral.....	12
1.4 Objetivo Específico.....	13
1.5 Justificativa.....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 O processo de eletroerosão.....	13
2.2 Princípio Físico.....	15
2.3 Parâmetros envolvidos no processo de eletroerosão.....	17
2.4 Dielétrico .....	21
2.5 Limpeza.....	22
2.5.1 Limpeza por jato lateral.....	22
2.6 Material do eletrodo.....	24
2.7 Rugosidade.....	25
2.7.1 Rugosidade 3D.....	29
2.8 O parâmetro de banda $\alpha$ .....	30
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1 Material do corpo de prova.....	34
3.2 Preparação dos corpos de prova e eletrodos.....	35
3.3 Medição da rugosidade.....	36
3.4 Parâmetros de controle.....	37
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>

<b>5 ASPECTOS OPERACIONAIS.....</b>	<b>48</b>
5.1 Cronograma.....	48
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>49</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNCIDE A .....</b>	<b>54</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>58</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O processo de eletroerosão é um procedimento de usinagem não convencional que vem ganhando espaço ultimamente. A eletroerosão por penetração se destaca quando comparado a outros processos de usinagem convencionais, pois a utilização deste processo prioriza a aplicação em materiais de alta dureza e resistência à abrasão. Embora em princípio não seja um processo caro, devido às pequenas taxas de remoção em comparação com os processos convencionais de usinagem, faz com que o custo dos componentes produzidos seja elevado (SANTOS, 2010).

Apesar do presente trabalho enfatizar o processo de eletroerosão por penetração, este processo de usinagem pode ser aplicado de várias maneiras distintas de acordo com a necessidade de execução da peça e de projeto. Exemplo disso é a eletroerosão a fio que é melhor detalhada no decorrer do trabalho.

Em certas aplicações as superfícies erodidas devem atender à determinadas exigências de projeto e uma destas exigências é o acabamento superficial, a partir desta necessidade existe a importância em se analisar como o processo pode afetar a rugosidade e a área real de contato, sendo este o objetivo principal do trabalho.

## 1.1 Contexto do Tema

A descoberta da EDM se deve ao químico inglês Joseph Priestly que em 1770 descobriu o efeito erosivo de uma descarga elétrica ou centelha. Durante aproximadamente 100 anos, esse fenômeno passou a ser utilizado para a desintegração de vários metais para a produção de soluções coloidais.

Na década de 1930, o processo de eletroerosão foi utilizado para solucionar problemas de fabricação de máquinas e equipamentos quando era preciso recuperar peças em cujo interior havia ferramentas quebradas (machos, brocas, alargadores etc) conforme relata Schmidt e Sabo, 2008.

Com a eclosão da Segunda Guerra Mundial, ocorreram enormes dificuldades na obtenção de matérias-primas, além de exigir aumento da produção industrial a curto prazo e com o mínimo possível de desperdício. Nessa época um grupo de

cientistas liderados por R. Lazarenko desenvolveu o processo de eletroerosão, possibilitando a sua comercialização (SCHMIDT e SABO, 2008).

Com o desenvolvimento de liga carbonetadas e materiais extremamente duros o desenvolvimento do processo de usinagem por eletroerosão tem se intensificado. Uma outra característica que justifica seu estudo e a pesquisa é que os processos tradicionais de usinagem geram calor e tensões na superfície usinada, produzem enormes cavacos e afetam as características estruturais e superficiais da peça, portanto, não são adequados para produzir superfícies de alta qualidade, sem distorções e sem alterações micro estruturais(SCHMIDT e SABO, 2008). Já na usinagem por eletroerosão, a peça permanece submersa em um líquido, assim, há rápida dissipação do calor gerado, além disso não existe força de corte, pois não há contato entre a ferramenta e a peça, não se formando as tensões comuns dos processos convencionais de usinagem e propiciando através do controle adequado dos parâmetros de usinagem uma boa qualidade superficial (SCHMIDT e SABO, 2008).

## **1.2 Caracterização do Problema**

Através do estudo do processo procura-se com este trabalho de pesquisa relacionar o processo com a rugosidade 3D que será avaliada por interferometria óptica. Na utilização deste tipo de procedimento de usinagem (neste caso, eletroerosão por penetração) é imprescindível um bom acabamento superficial. Em sua grande maioria, se refere a confecção de estampos de corte e moldes para plástico, cujas cavidades exigem acabamento fino que normalmente é finalizado com o polimento, mas quanto melhor se conseguir este acabamento de forma única evita-se um trabalho extenuante de polimento, que na maioria dos casos é manual e sujeito a erros.

## **1.3 Objetivo Geral**

Através da compreensão do processo de eletroerosão analisar como a energia de descarga influencia no acabamento superficial (rugosidade 3D) da amostra e relacionar a rugosidade medida com o parâmetro de banda  $\alpha$  que está relacionado

com o processo de usinagem para a obtenção da superfície analisada e a área real de contato.

#### **1.4 Objetivo Específico**

Obtenção do parâmetro  $\alpha$  obtido de acordo com a análise da rugosidade obtida no processo de eletroerosão.

#### **1.5 Justificativa**

A utilização do processo de eletroerosão tem se intensificado quando se refere à usinagem de materiais de dureza elevada e alta resistência à abrasão. Existem materiais desenvolvidos atualmente (ligas carbonetadas) na qual a utilização deste procedimento de usinagem, em certas situações, se torna a única opção viável. Para a aplicação correta do processo de eletroerosão é necessário um bom conhecimento da tecnologia do processo, portanto deve-se conhecer a relação entre os parâmetros dominantes do processo e o resultado do trabalho (KLOCKE e KÖNIG, 2007). Os processos especiais de usinagem utilizam tecnologias e conceitos novos, se comparados com processos GD(Geometria Definida) e GND(Geometria Não Definida) e surgiram para suprir necessidades específicas, porém com o tempo passaram a ocupar mais espaço na usinagem e a serem mais competitivos (BENEDICT, 1987). Um destes processos é o processo de eletroerosão.

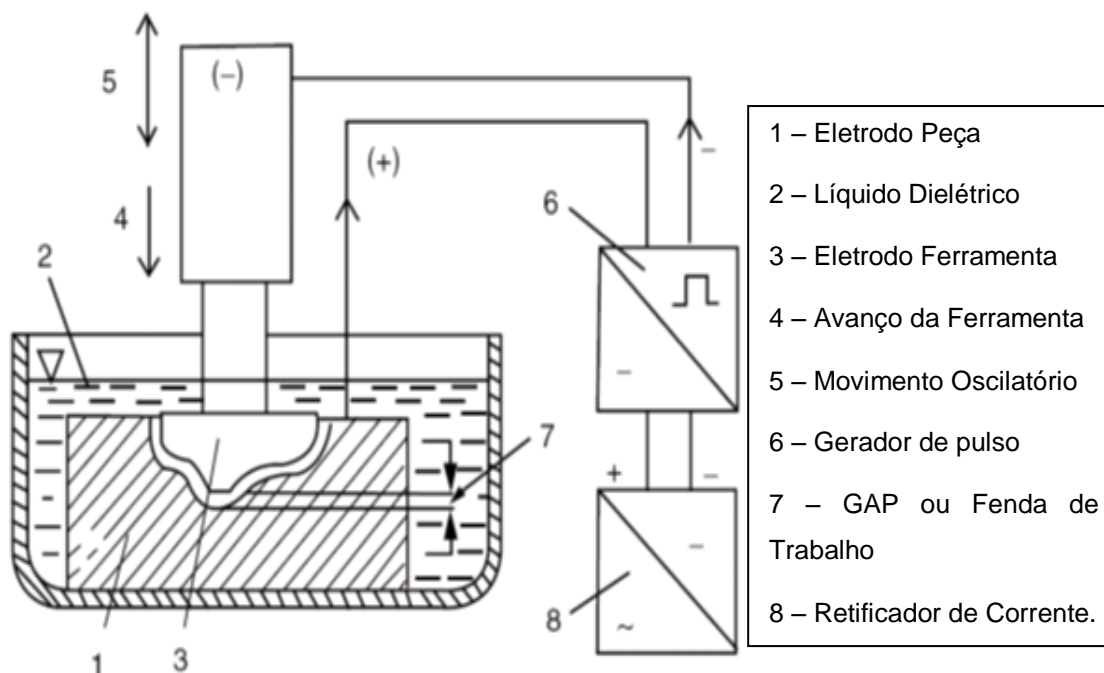
## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 O processo de eletroerosão**

O processo de eletroerosão se resume à remoção de material através da fusão provocada por descargas elétricas intermitentes entre um eletrodo e a superfície a ser usinada (COSTA *et al.*, 2011). Apesar do procedimento ser de origem elétrica (descargas elétricas) a remoção é exclusivamente térmica. O processo de remoção de maneira geral, é efetuado sob um líquido não condutor de eletricidade (dielétrico).

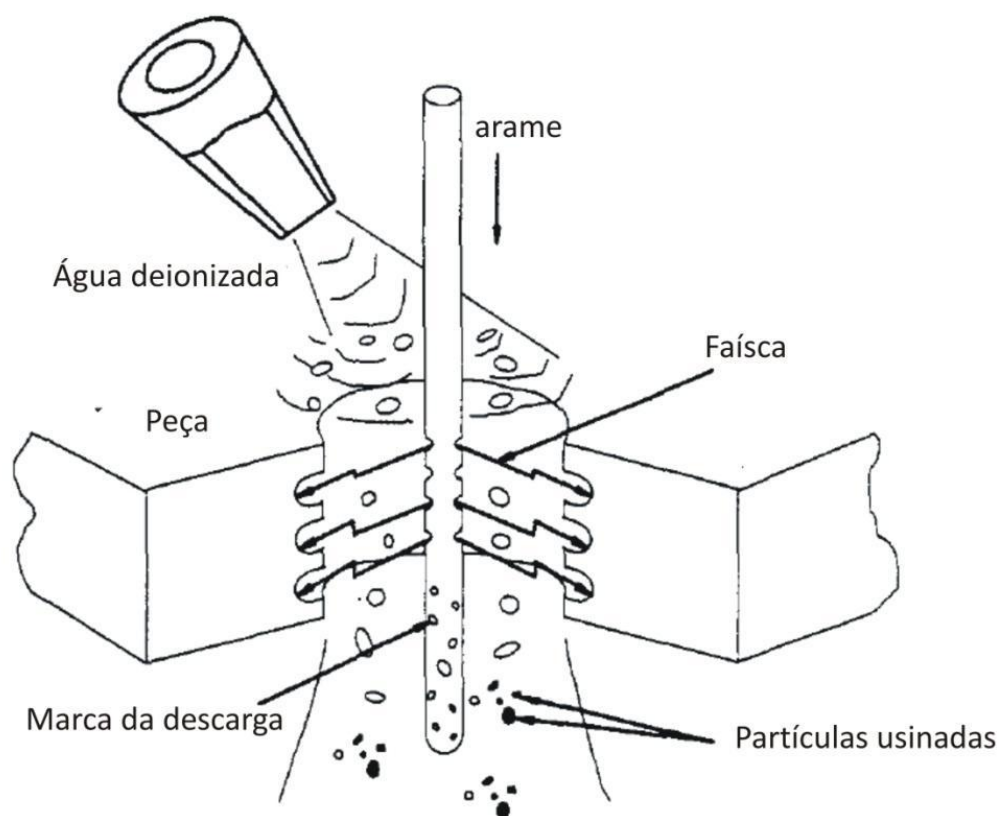
No presente trabalho, o foco é o estudo da eletroerosão por penetração na qual o eletrodo-ferramenta imerge no eletrodo-peça possibilitando o formato da cavidade.

O esquema da figura 2.1 mostra de forma esquemática de como é realizado o processo de eletroerosão por penetração, identificando a máquina em si e algumas características fundamentais do processo.



**Figura 1 - Processo de eletroerosão por penetração (apud SANTOS,2010)**

Apesar do processo de eletroerosão por penetração ser o mais comum em termos de aplicações industriais existe outro processo que vale a pena ser ressaltado, o processo de eletroerosão a fio. A eletroerosão a fio consiste de um eletrodo-ferramenta na forma de fio com aplicação principal na realização de cortes em formatos precisos ou perfurações de diâmetros pequenos, normalmente o líquido dielétrico utilizado nas máquinas de eletroerosão a fio é a água desmineralizada, conforme mostra a figura 2.1:



**Figura 2 - Processo de eletroerosão a fio (SANTOS, 2010)**

A utilização dos processos de eletroerosão, apesar de não ser tão comum quanto aos processos de usinagem GD e GND possui grande aplicação industrial. Destaca-se em usinagem de peças com geometria complexa e alta dureza, tais como moldes e matrizes, setores automotivo, aeroespacial, médico, ótico, de joalheria, dental, de ferramentas, de prototipagem e de componentes cirúrgicos (SIMAO et al, 2003; HO e NEWMAN, 2003; RAMASAWMY e BLUNT, 2004; FONDA et al., 2008 apud SANTOS, 2010).

## 2.2 Princípio Físico

Para que a usinagem por eletroerosão ocorra o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça devem se manter a uma certa distância, esta distância é conhecida como fenda de trabalho ou gap. Ao aplicar-se uma tensão entre os eletrodos maior que a tensão de rompimento do dielétrico têm-se a descarga de uma faísca. Em eletroerosão por penetração normalmente, usa-se um tipo de óleo hidrocarboneto como dielétrico (SANTOS,2010). O dielétrico desempenha um papel importante no

processo, pois não atua apenas como meio dielétrico mas também é responsável pelo resfriamento do canal de plasma e na lavagem da fenda de trabalho. A erodibilidade do material não depende de suas propriedades mecânicas, mas apenas de suas propriedades físicas (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

De acordo com Klocke e König (2007), os fenômenos físicos que ocorrem durante a formação da centelha (faísca) são explicados detalhadamente e na ordem de ocorrência dos mesmos. A ruptura do dielétrico em parte pode ser explicado pela ionização por impacto, e por outro lado, pelo calor que evapora o dielétrico. A teoria da ionização por impacto afirma que os elétrons são acelerados pelo campo elétrico estabelecido entre os eletrodos e chocam-se com as moléculas do dielétrico liberando mais e mais elétrons, dando início a uma reação em cadeia que aumenta consideravelmente a energia elétrica, tal fenômeno é também conhecido como *stremmer*. Já do ponto de vista térmico a ruptura se dá devido a evaporação do meio dielétrico por Efeito Joule.

Após a ruptura do dielétrico tem-se altas densidades de energia no canal de descarga devido à pequena região de contato com os extremos da centelha, esta energia se subdivide com a vizinhança do eletrodo-ferramenta, eletrodo-peça e o canal de plasma .

Durante a formação da centelha existe a ocorrência de dois efeitos importantes: o *efeito Skin* que consiste no fluxo da corrente elétrica que é estabelecido quase que na periferia do canal formado e o *Efeito Pinch* que consiste na etapa de fusão e evaporação de parcelas do material de peça e eletrodo com o efeito da passagem da corrente para a região interna do canal de descarga (SANTOS,2010). A figura 2.3 representa a ocorrência dos fenômenos físicos que ocorrem durante a formação da centelha.



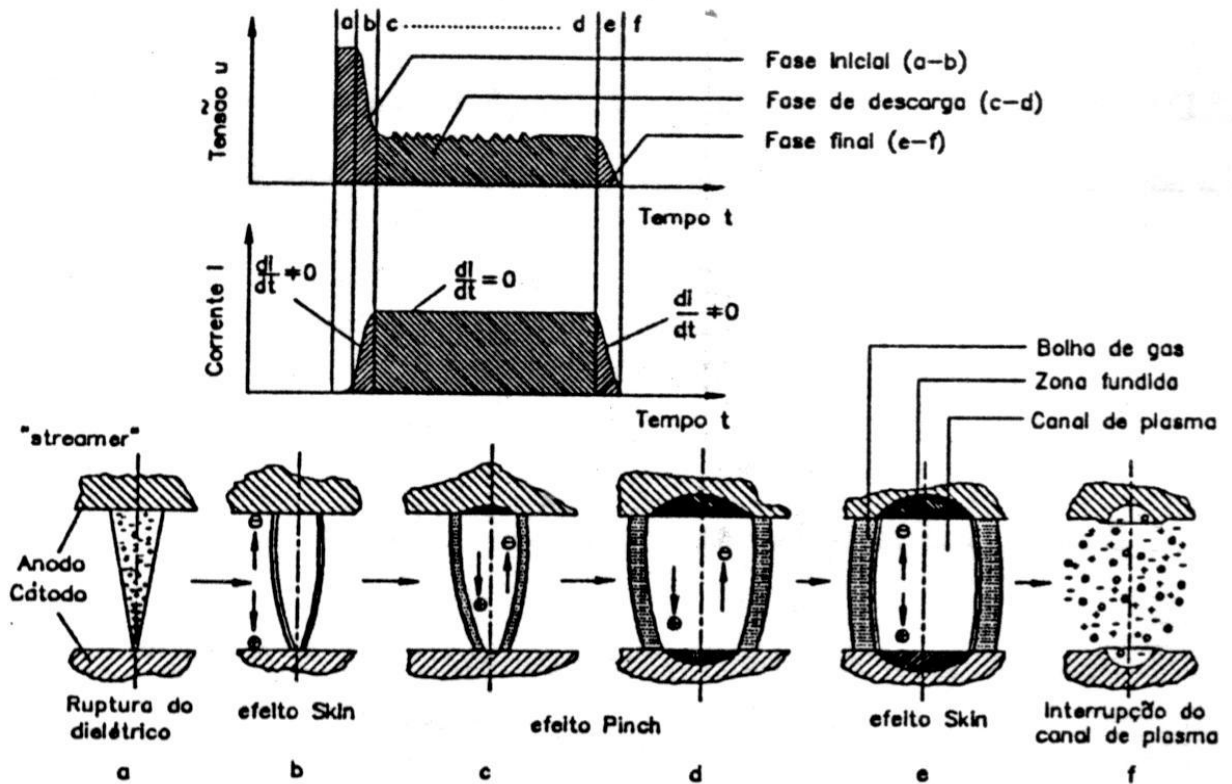


Figura 3 - Fenômenos físicos relacionados o processo de descarga na eletroerosão (WEINGAERTNER, 1996 - 98)

As transformações da microestrutura dos materiais dos eletrodos bem como as tensões residuais na superfície da maioria das peças que podem levar inclusive à microfissuras, denotam a natureza térmica do processo de eletroerosão (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

### 2.3 Parâmetros envolvidos no processo de eletroerosão

A parcela de material removido nos eletrodos-peça e ferramenta, bem como o acabamento das superfícies, principalmente a rugosidade, dependem das propriedades físicas dos materiais do eletrodo e da peça, do tipo do meio dielétrico e de como o operador manipula alguns parâmetros de suma importância, tais como: polaridade, tempo de descarga e corrente de descarga. Uma escolha adequada do material do eletrodo e dos parâmetros propicia uma melhor qualidade de acabamento e estrutural da peça (KLOCKE e KÖNIG, 2007). O foco nesta pesquisa é analisar o acabamento superficial em função destes parâmetros portanto é

necessário o esclarecimento de cada um deles para uma melhor compreensão do processo. Alguns parâmetros de entrada são descritos a seguir:

#### **a) Gap ou fenda de trabalho**

É a distância entre a peça e o eletrodo na qual é produzida a centelha. Em gap alto o tempo de usinagem é menor, mas tende a aumentar a rugosidade da peça (SANTOS,2010)

#### **b) Tempo de onda ligado (Ton)**

É o tempo durante a qual a centelha (faísca) possui energia elétrica. Este valor é inserido diretamente na máquina e se situa na faixa de alguns microssegundos e alguns milissegundos (BENEDICT, 1987). Via de regra, quanto maior for o Ton maior será o rendimento, ou seja, maior a taxa de remoção do material, mas compromete o acabamento superficial com o aumento da rugosidade. Ton alto desgasta menos o eletrodo e mais a peça.

Com pulsos de curta duração (baixo ton), mais partículas negativas que positivas entram em movimento. Quanto mais partículas de um determinado tipo fluírem na direção do eletrodo ou peça, é mais intenso o calor gerado, e maior a quantidade de material removido deste. Com pulsos de longa duração (alto ton), partículas positivas e negativas em igual quantidade entram em movimento. Mas, devido à maior massa das partículas positivas, maior será a quantidade de material removido na área de atuação destas (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).

#### **c) Tempo de onda desligado (Toff)**

É o tempo necessário à estabilização do ambiente no *gap*, incluído o tempo de explosão da bolha de gases, após o tempo de corrente ligada. Neste tempo de pausa ocorre a interrupção da descarga. Pode afetar drasticamente a velocidade do processo, mas é fundamental para a estabilidade deste. O Toff não influi no desgaste do eletrodo, uma vez que este ocorre devido à energia disponibilizada apenas durante o Ton (GUITRAU, 1997).

#### **d) Corrente de descarga (i)**

.A corrente é o fator mais influente na textura da superfície gerada (RAWASAWMY e BLUNT, 2004). Com o aumento da corrente de descarga, observa-se um crescimento progressivo da taxa de remoção de material. Ao trabalhar-se com eletrodos de cobre observa-se que um aumento da corrente propicia um aumento do desgaste relativo (relação entre a taxa de desgaste da ferramenta e a taxa de remoção de material da peça). Uma diminuição da corrente de descarga faz com que o gap diminua e proporciona um melhor acabamento superficial. É aconselhável que para operações de desbaste utilize-se altas correntes no intuito de se obter uma maior remoção de material mas com aumento na rugosidade. Já para o acabamento, diminui-se a corrente reduzindo-se a rugosidade e diminuindo a taxa de remoção (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

A corrente utilizada no processo de eletroerosão deve ser contínua. Na corrente alternada, a intensidade da corrente é variável, gerando inversões de polaridade (o mesmo pólo ora é positivo, ora é negativo). No processo de eletroerosão, isso poderia levar a um desgaste maior da ferramenta do que da peça (SCHMIDT e SABO, 2008).

Deve-se salientar que a influência da energia de descarga (corrente) sobre a taxa de remoção permite determinar diretamente a dependência da rugosidade em função da corrente.

#### **e) Tempo de descargas sucessivas**

As descargas sucessivas ao longo de toda a superfície do eletrodo fazem a usinagem da peça. O tempo de descargas sucessivas significa o tempo durante o qual as descargas são disparadas sem que o eletrodo retroceda, seguido pelo tempo de retração, que é o tempo que o eletrodo retrocede, portanto não disparando faíscas (SANTOS, 2010). A frequência das descargas pode chegar até 200.000 ciclos por segundo.

#### **f) Polaridade**

A escolha da polaridade adequada é imprescindível para um bom rendimento no processo de usinagem por eletroerosão, pois a contínua troca de posição entre partículas (+) e (-) do eletrodo e peça ocasiona um fluxo de corrente através do canal de descarga, gerando calor suficiente para provocar a fusão do material. (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988)

A polaridade tem alta influência sobre o desgaste e a taxa de remoção. Para tempos de descarga longos a ferramenta é mantida com polaridade positiva, com o intuito de garantir um bom comportamento dos valores de erosão (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

A polaridade negativa só faz sentido para tempos de descarga curtos ou para certos materiais como o metal duro ou titânio (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

Em processos de eletroerosão por penetração, a polaridade do eletrodo é normalmente positiva, o que previne o desgaste no eletrodo e diminui a velocidade de usinagem (GUITRAU, 1997).

#### **g) Tensão de trabalho (U):**

Como a tensão de descarga é variável no tempo utiliza-se então uma tensão média que é a tensão de trabalho. Para uma tensão de trabalho muito pequena, observa-se descargas falhas e curto-circuitos, devido ao gap muito pequeno. Disto resultam taxas de remoção pequenas e desgaste relativo elevado. Deve-se tomar cuidado quando aumenta-se sucessivamente a tensão de trabalho pode levar a tempos de retração muito longos devido ao aumento demasiado do gap (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

#### **h) Duty Time (DT) ou Relação de contato ( $\tau$ ):**

DT é uma relação entre o TON e o tempo total do pulso (ou ciclo de uma faísca). Um DT pequeno significa um mau aproveitamento da energia disponível na unidade de tempo e com isto, uma redução da taxa de remoção. Portanto o DT deve ser escolhido de tal forma que se garanta uma deionização suficiente do canal de descarga e se garanta a estabilidade do processo (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

### g) Energia de Descarga (E)

O que caracteriza e eficiência do processo é a potência elétrica  $P = V.I$  (Tensão x Corrente) e a duração do pulso elétrico, em outras palavras a energia de descarga que pode é definida como:

$$E = \int P dt \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Para altas energias de descarga observa-se um aumento da taxa de remoção de material e da rugosidade, o intuito deste trabalho é analisar superfícies erodidas com acabamento fino, portanto serão utilizados baixos valores de corrente.

## 2.4 Dielétrico

O dielétrico possui as seguintes funções: promover o estrangulamento do canal de descarga aumentando a densidade de energia, remover as partículas erodidas da fenda de trabalho e refrigerar o local de trabalho. Como dielétricos são adequados hidrocarbonetos, como querosene, gasolina de teste e óleo de transformador (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

Maior rigidez dielétrica (capacidade de insulação de um dado fluido para processos de eletroerosão) implica em menor distância entre ferramenta e peça, com conseqüente aumento de precisão da usinagem. Alta rigidez dielétrica ajuda a minimizar o arco e é freqüentemente tida como indicadora de desempenho nos processos de eletroerosão (ARANTES, 2001).

Quanto menor o tempo de desionização, que é o tempo para os íons e elétrons se recombinarem depois de uma descarga, menor é o tempo necessário entre pulsos subseqüentes que evitam as condições de arco (ARANTES, 2001).

A viscosidade do dielétrico acima de um certo nível é necessária para a onda de choque do fluido expelir os produtos de erosão, mas, ao mesmo tempo, uma alta viscosidade impede o movimento das partículas (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).

Para pulsos de pequena energia (baixo ton e usinagem de acabamento) é aconselhável uma baixa viscosidade, mas para pulsos de alta energia (alto ton e

usinagem de desbaste) são produzidas partículas de metal maiores e a viscosidade do dielétrico é recomendada superior para a maior rentabilidade do processo (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).

A condutividade térmica do fluido dielétrico também influencia no processo de eletroerosão, pois quanto maior a condutividade térmica menor é o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas na zona de erosão. Isto reduz a possibilidade das partículas aderirem no eletrodo ou na superfície da peça (ARANTES, 2001).

## **2.5 Limpeza:**

A limpeza ou lavagem é a circulação do dielétrico entre o eletrodo e a peça a ser usinada. A maioria dos trabalhos exigem uma limpeza sob pressão ou succionada ou uma combinação dos dois processos. Em trabalhos complexos a limpeza é subsidiada por um levantamento esporádico do eletrodo. Como a limpeza influi consideravelmente nos valores característicos do desgaste e das taxas de remoção, bem como na estabilidade do processo, a vazão e a pressão entrada devem ser rigorosamente adequados ao trabalho a ser executado (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

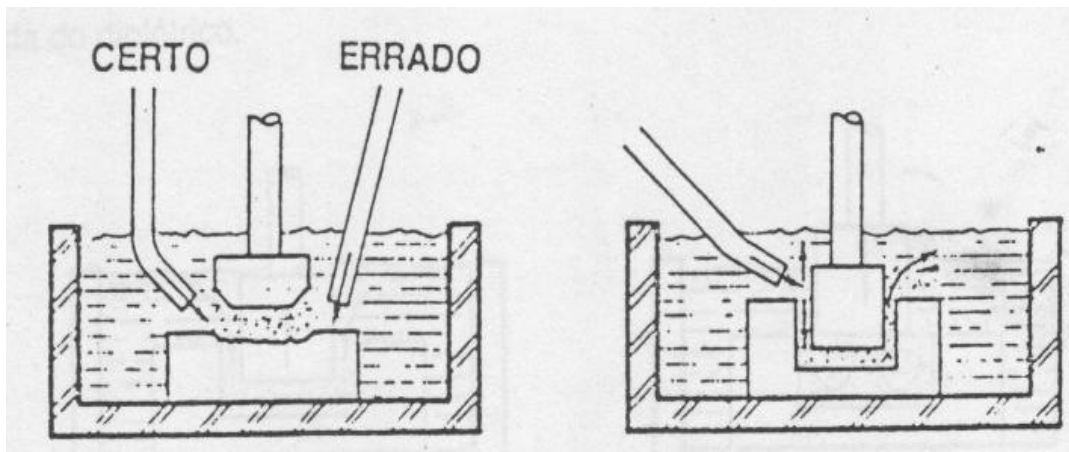
Uma lavagem inadequada permite que as partículas de metais e os resíduos de carbono, resultantes do fracionamento do fluido dielétrico, se acumulem na interface ferramenta peça. Devido à condutividade do metal e do carbono, o acúmulo dos mesmos interfere na função do servomecanismo de avanço e também aumenta a quantidade de arcos estáticos. Essa interferência representa em termos práticos um diminuição da taxa de remoção do material (ARANTES, 2001).

### **2.5.1 – Limpeza por jato lateral**

Este processo de limpeza deve ser utilizado se não for possível fazer pelo menos um orifício no eletrodo ou peça. Este método exige o emprego de bicos de injeção, orientados para garantir uma perfeita abrangência de toda a superfície de trabalho (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).

No caso de usinagem plana a inclinação do bico deve ser ajustado de acordo com o ângulo de gravação. Quando as formas longitudinais não são planas, devem ser colocados bicos especiais que tenha o formato do perfil (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).

Quando a direção da lavagem não for paralela à parede do eletrodo, turbulências são produzidas e somente uma pequena cota do dielétrico penetra na zona de trabalho, obtendo-se assim uma fraca lavagem, conforme mostra a figura 4 (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).



**Figura 4 - Procedimentos: adequados de lavagem (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).**

Se a limpeza for dirigida corretamente, passará o máximo de dielétrico pela zona de trabalho. A limpeza nunca deverá ser feita pelo lados opostos do eletrodo, já que as correntes se anulariam no fundo da cavidade, e não permitiriam a expulsão das partículas, isto fica claro na figura 5. No caso de peças retangulares, o jato de líquido deverá ser projetado para a face mais ampla do eletrodo e maneira que esse seja obrigado a penetrar até o fundo da cavidade (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC).

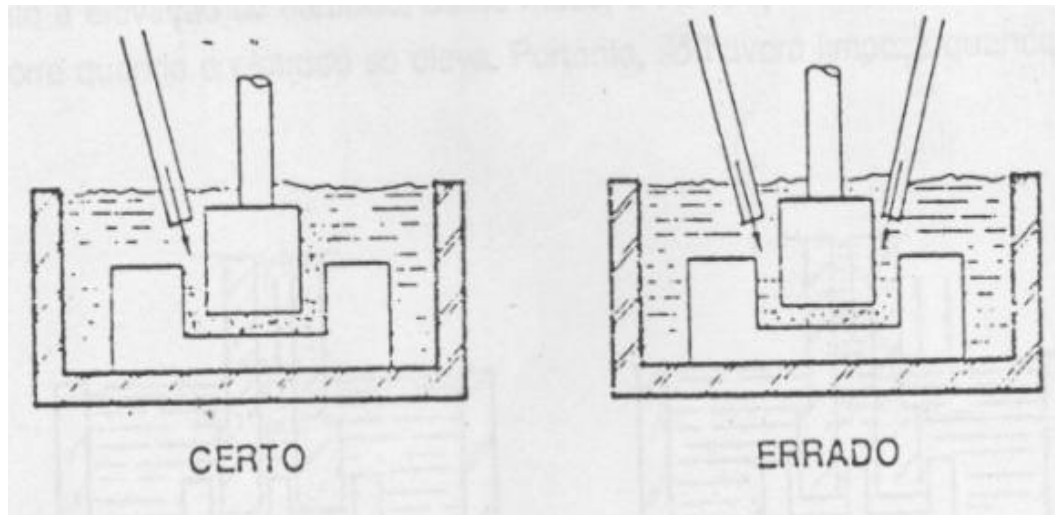


Figura 5 - Comparação entre procedimento de limpeza correto e inadequado. (BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – ENGEMAC, 1988).

## 2.6 Material do eletrodo:

Os materiais mais comuns na confecção dos eletrodos são o cobre e o grafite, materiais que possuem propriedades físicas distintas e que dependendo da aplicação, a escolha do eletrodo adequado é de fundamental importância. Enquanto o cobre é um excelente condutor e de fácil fabricação, o grafite tem alto ponto de fusão, mas é de difícil fabricação quando se refere à eletrodos de pequenas dimensões por ser um material frágil. A tabela 1 a seguir exemplifica as propriedades físicas de ambos os materiais.

Tabela 1: - Propriedades físicas do cobre e do grafite (CHE HARON et al., 2008 apud SANTOS, 2010).

Propriedades Físicas	Grafite	Cobre
Resistividade Elétrica ( $\mu\Omega/\text{cm}$ )	0,12	1,96
Condutividade elétrica comparado com prata (%)	0,11	92
Condutividade Térmica (W/mK)	160	380,7
Ponto de Sublimação e Fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	3500	1083
Calor Específico ( $\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{C}$ )	0,17-0,2	0,092
Peso Específico a $20^{\circ}\text{C}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,75	8,9
Coefficiente de expansão térmica ( $\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	7,8	6,6



Os melhores resultados são obtidos normalmente com o grafite, devido ao alto ponto de fusão deste material. No entanto, como o grafite é um material que se contamina com facilidade e apresenta diferentes porosidades, muitas vezes pode apresentar baixo desempenho quanto à relação de desgaste (BENEDICT, 1987).

O grafite é mais adequado pra trabalhos de desbaste com altas correntes de descarga e tempos de erosão longos, ao passo que o cobre é mais adequado para o trabalho de acabamento ( tempo de descarga curto, corrente de descarga pequena).

## **2.7 Rugosidade**

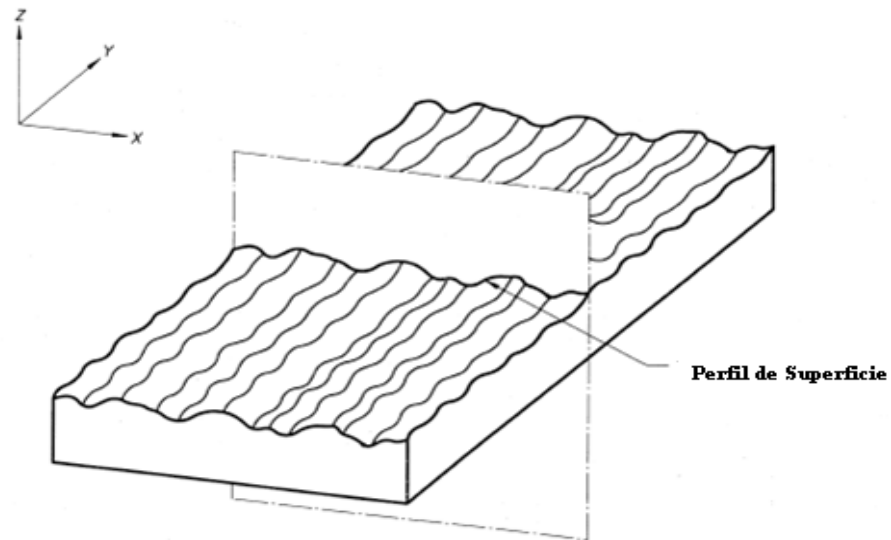
Para a caracterização das superfícies erodidas deve ser considerada tanto a topografia (rugosidade, ondulações) como a alteração metalúrgica das camadas superficiais. Ambas as características influenciam a funcionalidade das peças. O presente trabalho enfatizará exclusivamente a rugosidade (BRUSHAN, 1999).

A rugosidade pode ser definida como conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície (BRUSHAN, 1999 apud SANTOS, 2010).

As superfícies contém irregularidades de várias ordens desde o desvio de forma até irregularidades da ordem de distância interatômicas. Nenhum método de usinagem, mesmo o mais preciso, é capaz de produzir uma superfície molecularmente plana nos materiais convencionais. Mesmo a superfície mais lisa contém irregularidades com uma variação de altura que excede as distâncias interatômicas (BRUSHAN, 1999 apud SANTOS, 2010).

A medição da rugosidade é normalmente representada em escalas distintas para a direção vertical e horizontal, isso para evidenciar a mudança do perfil de maior interesse na análise de uma superfície, já que as escalas de variação para dimensões perpendiculares à superfície analisada são, em geral, menores que as dimensões paralelas à superfície. (HUTCHINGS,1992).

O perfil da uma superfície é definido pela norma ISO 4287 como o perfil que resultada interseção da superfície real com um determinado plano, conforme representado na figura 6 :



**Figura 6 - Perfil de superfície segundo norma ISO 4287. (MONTAÑEZ CALAO, 2011)**

Muitos dos perfis de rugosidade analisados em engenharia são obtidos por contato direto, através de um apalpador de um perfilômetro ou de um rugosímetro. Dois grandes efeitos podem modificar a aquisição do perfil analisado, e conseqüentemente fornecer através destes aparelhos perfis de superfície que não retratem a realidade: a carga aplicada ao apalpador de leitura e o raio da ponta do apalpador (FACCIO, 2003).

Com relação a distorção causada pela carga aplicada ao apalpador, sumariamente pode-se afirmar que é praticamente impossível obter uma leitura de perfil por contato, sem que este contato não danifique a superfície em questão. Mas outros meio podem ser utilizados para obter tais perfis sem o contato físico, através de uma maneira ótica: microscópios de varredura eletrônica, por exemplo, e outros casos de interferometria ótica em que o perfil da superfície é adquirido por meio de varredura de algum tipo de onda eletromagnética. Através destes pode-se registrar perfis sem modificação alguma em sua estrutura, ao menos no nível microscópico (FACCIO, 2003).

Já a distorção devido ao raio do apalpador se baseia no conceito de por menor que seja o raio do apalpador, ele nunca será zero, conseqüentemente o apalpador não pode ser utilizado para analisar superfícies precisamente pois a dimensão dos perfis é muito menor que o raio do apalpador, o que implicaria em um erro de leitura e novamente a única saída plausível para resolver este problema é a utilização de

meios eletrônicos para obtenção de perfis sem que haja o contato entre a superfície a ser analisada e o aparelho que executará a medição (FACCIO, 2003). Devido a estes problemas será utilizado na análise experimental um perfilômetro 3D baseado em interferometria ótica eliminando os problemas relatados anteriormente

Nos últimos anos foram realizados grandes esforços para a modernização dos processos de medição 3D. As técnicas mais comuns se referem à interferometria de luz branca ou projeção de franjas, a operação é rápida cumprindo assim os requisitos para aplicações industriais (SCHMÄHLING, HAMPRECHT e HOFFMANN, 2006).

A interação entre duas superfícies se dá através de uma área de contato é de esperar que a descrição e análises de superfícies baseadas nas medições 3D represente mais realisticamente e efetivamente os fenômenos a elas relacionados (FREITAS, 2006).

Na superfície do aço pode-se distinguir com nitidez os sinais de fusão e solidificação. No entanto na superfície do metal duro detecta-se microfissuras na forma de figuras-Craquelet (microfissuras que podem ser observadas em algumas cerâmicas e louças vitrificadas). A figura 7 mostra as fissuras que causam microporos que se formam pela saída do material vaporizado. Com isto, se torna nítido que a estrutura e acabamento superficial, além dos fenômenos energéticos, também dependem do material da peça (KLOCKE e KÖNIG, 2007).



**Figura 7 - Microfissuras na superfície do metal duro (Figuras Craquelet)**

Observa-se um máximo de rugosidade com a diminuição da tensão de trabalho (U) de 100 a 40V que é decorrente da diminuição do retardo da ignição das faíscas e em decorrência do tempo de descarga. A rugosidade diminui consideravelmente

para  $U < 40V$ . Este fato decorre da forma mais plana das crateras e da diminuição das partículas removidas. Superfícies produzidas com tensões de trabalho muito pequenas, dão a impressão de terem uma camada superficial fundida e misturada com o material do eletrodo – o que é demonstrado pelo teor de cobre detectado na superfície – formando por assim dizer, uma camada mais lisa e fina quando comparada com tensões de trabalho mais elevadas (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

Além dos parâmetros de regulação e dos materiais utilizados, o meio dielétrico também influencia na rugosidade. A viscosidade do dielétrico determina preponderantemente a extensão do canal de descarga e, com isso a configuração da cratera. A composição do dielétrico, no entanto, determina as condições do choque térmico. As temperaturas bastante elevadas propiciam a difusão do carbono na superfície da peça que é liberado pelo próprio dielétrico (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

Um fato importante, e que deve ser ressaltado, é que a rugosidade não é um fator predominante na diminuição da vida das peças. Antes porém a presença de microfissuras é suficiente para introduzir fissuras por fadiga (KLOCKE e KÖNIG, 2007).

### 2.7.1 Rugosidade 3D

A utilização de procedimentos que utilizam a análise de rugosidade 3D é relativamente recente, mas atualmente a necessidade de sua implementação tanto no meio acadêmico quanto no industrial se tornou uma prática comum devido à exigências de precisão cada vez maiores que acompanham o desenvolvimento tecnológico. Sendo assim é de fundamental importância o entendimento dos parâmetros que são avaliados na análise de rugosidade. Existem diversos parâmetros atualmente, mas alguns são substanciais para o desenvolvimento do trabalho:

**1)  $S_q$**  - parâmetro de dispersão que se refere ao valor médio quadrático dos pontos analisados na área de amostragem, matematicamente é definido como:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x_i, y_j)} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:  $M$  é o número de pontos por perfil e  $N$  é o número de perfis;  $\eta(x,y)$  é o conjunto de dados da superfície que depende dos requisitos da análise. Em geral  $\eta(x,y)$  é obtido através do uso de técnicas de filtragem.

2)  $S_{dq}$  - raiz quadrática média da inclinação da superfície dentro da área de amostragem:

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(M-6)(N-6)} \sum_{j=4}^{N-3} \sum_{i=4}^{M-3} \rho_{i,j}^2} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde  $\rho_{i,j}$  é calculado usando o polinômio de Lagrange, com sete pontos em direções ortogonais (DONG, SULLIVAN e STOUT, 1994).

3)  $S_{ds}$  - número de picos por unidade de área que é definido como:

$$S_{ds} = \frac{N^\circ \text{ de cumes}}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Um outro parâmetro de rugosidade muito importante e muito utilizado na bibliografia a respeito do assunto é o parâmetro  $R_a$ . É um parâmetro 2D que segundo as normas DIN EN 4287 e ASME B46.1 é definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em relação à linha média, dentro do percurso de medição, conforme mostrado na figura 8:

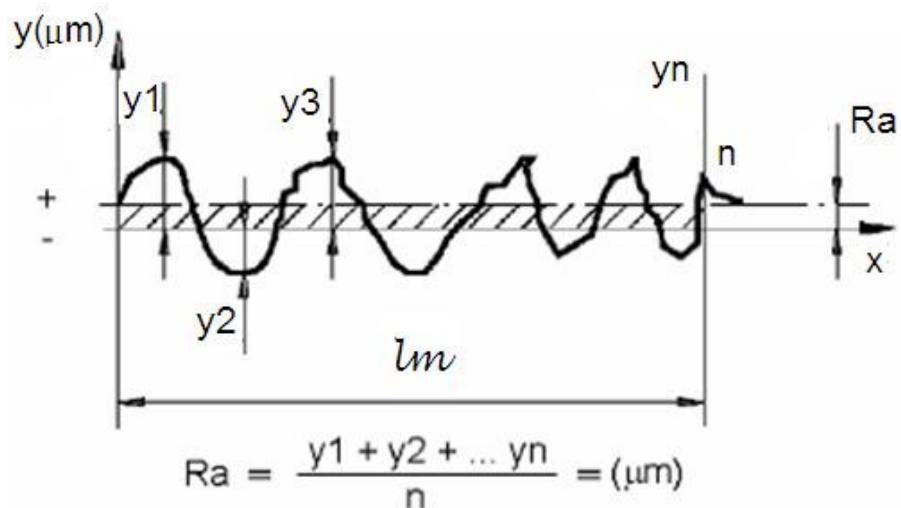


Figura 8 - Rugosidade  $R_a$

Como já mencionado a utilização da rugosidade 3D permite análises de maior exigência em âmbito acadêmico ou industrial. O parâmetro Ra é um parâmetro de uso comum em indústrias, aplicável à maioria dos processos de fabricação e quase todos os equipamentos de medição apresentam esse parâmetro. Possui algumas desvantagens como: a presença de um pico ou vale atípico oriundo do processo não é identificado e pode ocultar algum defeito; seu valor não define a forma das irregularidades e pode ser associado a diferentes processos; não distingue picos de vales (PIRATELLI, 2011).

## 2.8 O parâmetro de banda $\alpha$

O parâmetro de banda  $\alpha$  é oriundo do modelo de Greenwood e Williamson que relaciona microgeometrias, medindo fisicamente quantidades mais compreensíveis, como a densidade de contato, carga, área real e densidade de contato plástico. (McCool, 1987). A área real de contato de uma dada separação média de planos depende apenas da largura do parâmetro  $\alpha$  e é dependente do processo de obtenção da superfície (usinagem) e dos parâmetros utilizados (McCOOL, 1986). Matematicamente é definido como:

$$\alpha = \frac{M_0.M_4}{M_2^2} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Onde  $m_0$ ,  $m_2$ , e  $m_4$  são conhecidos como os momentos espectrais de primeira, segunda e quarta ordem do perfil. Eles são equivalentes ao quadrado da altura média, a inclinação e segunda derivada de um perfil em uma direção arbitrária (AMARAL, 2013), ou seja:

$$m_0 = E(z^2) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$m_2 = E\left\{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right\} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$m_4 = E\left\{\left(\frac{d^2z}{dx^2}\right)^2\right\} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Sendo  $z(x)$  o perfil em uma direção arbitrária  $x$  e “ $E\{ \}$ ” indica uma expectativa estatística. Os momentos espectrais definidos nas equações 2.6, 2.7 e 2.8 estão diretamente relacionados com os parâmetros de rugosidade, em outras palavras, ao obter-se as medidas dos parâmetro de rugosidade pode-se obter de maneira direta o valor do parâmetro de banda  $\alpha$ :

$$M_0 = Sq^2 \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$M_2 = Sdq^2 \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$M_4 = \frac{Sds \cdot Sdq^2 \cdot 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3}}{10^6} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

A obtenção do parâmetro de banda  $\alpha$  é um trabalho recente, portanto informações apuradas com relação ao mesmo são de difícil acesso. De acordo com Amaral (2013) através da análise de superfícies retificadas foram obtidos os seguintes valores, conforme mostrado na tabela 2:

**Tabela 2 : Valores do parâmetro alfa para superfícies retificadas (AMARAL, 2013)**

C.P.	Ra( $\mu\text{m}$ )	Sa ( $\mu\text{m}$ )	Sq ( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds ( $\mu\text{m}^2$ )	Alfa
1	0,71 $\pm$ 0,06	3 $\pm$ 1	4 $\pm$ 1	0,27 $\pm$ 0,005	13920 $\pm$ 70	93
2	0,67 $\pm$ 0,07	2,2 $\pm$ 0,3	2,7 $\pm$ 0,4	0,27 $\pm$ 0,003	15200 $\pm$ 200	50
3	0,66 $\pm$ 0,13	2 $\pm$ 0,3	2,4 $\pm$ 0,3	0,22 $\pm$ 0,05	13000 $\pm$ 4000	49
4	0,7 $\pm$ 0,04	4 $\pm$ 2	5 $\pm$ 3	0,25 $\pm$ 0,004	12200 $\pm$ 200	164
5	0,89 $\pm$ 0,13	2,5 $\pm$ 0,1	3,1 $\pm$ 0,1	0,31 $\pm$ 0,03	15000 $\pm$ 400	49
6	0,9 $\pm$ 0,14	2,7 $\pm$ 0,5	3,3 $\pm$ 0,6	0,31 $\pm$ 0,04	13800 $\pm$ 600	51
7	0,84 $\pm$ 0,07	5 $\pm$ 2	6 $\pm$ 3	0,28 $\pm$ 0,002	12800 $\pm$ 200	190
8	0,79 $\pm$ 0,18	3,2 $\pm$ 0,4	4 $\pm$ 0,5	0,29 $\pm$ 0,04	12700 $\pm$ 300	80

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental consiste da realização de 15 procedimentos de eletroerosão com a variação dos seguintes parâmetros: corrente de descarga ( $i$ ), o tempo de onda ligada ( $T_{on}$ ), o tempo de onda desligada ( $T_{off}$ ), tais parâmetros influenciam diretamente na energia de descarga, principalmente a corrente. O critério para estas escolhas levam principalmente em consideração a facilidade de atribuição das mesmas, pois podem ser controladas diretamente na máquina de maneira simples e rápida.

As correntes escolhidas foram relativamente baixas com o intuito de analisar a superfície de forma mais precisa, pois em correntes menores a rugosidade percebida também é mais baixa o que facilita a análise pelo perfilômetro 3D e a precisão dos resultados. Os tempos de descargas sucessivas foram mantidos constantes durante toda a execução experimental. A amostra permaneceu submersa no fluido dielétrico (querosene) durante todo o procedimento de usinagem. Quanto à variação do tempo de onda ligado ( $T_{on}$ ) e do tempo de onda desligado ( $T_{off}$ ), tais valores estão interligados com a escolha da corrente, em outras palavras, de acordo com a corrente escolhida o manual da máquina estipula o  $T_{on}$  e o  $T_{off}$ . A tensão de trabalho foi de 250V que também está atrelada à escolha dos parâmetros. Inicialmente o intuito era trabalhar com acabamento microfino que utilizaria uma tensão de trabalho de 80V, mas por problemas técnicos não foi possível a utilização destes parâmetros, o que não comprometeu o desenvolvimento do trabalho.

Foram adotadas 5 especificações (Grupos) diferentes para a coleta de dados, em cada especificação realizadas 3 execuções experimentais com o intuito de analisar o erro estatístico.

Com o intuito da obtenção do parâmetro de banda  $\alpha$  (parâmetro que caracteriza a rugosidade da superfície em função do procedimento de usinagem utilizado) a amostra é submetida à análise do perfilômetro 3D que possibilita a obtenção dos parâmetros necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Para facilitar a análise algumas variáveis são mantidas constantes durante a experimentação como o meio de limpeza da fenda de trabalho, nível de fluido na cuba da máquina, profundidade de penetração dos eletrodos, tempo de recuo dos



eletrodos e rugosidade superficial inicial das superfícies dos eletrodos e dos corpos de prova. A polaridade utilizada será a positiva, pois para eletrodos de cobre, que é o caso do planejamento experimental salientado neste trabalho, o rendimento é maior.

O procedimento de eletroerosão abordado é de eletroerosão por penetração. Todo o procedimento experimental é realizado na máquina IBH - Hidro-matic 50A onde é realizada a variação dos parâmetros de entrada no painel de controle e mantidas constantes algumas condições de operação no processo que já foram citadas anteriormente. O esquema da máquina é mostrado de forma simples nas figuras 9:



**Figura 9 - Máquina utilizada no procedimento experimental**

No processo de eletroerosão não há contato entre a peça e o eletrodo, ou seja, não existem forças de corte no procedimento de usinagem, logo não há necessidade da peça (amostra) ficar presa junto à mesa da máquina, mas por questões de agilidade no trabalho em algumas situações a peça é presa em uma placa de castanhas ou uma morsa, conforme mostra a figura 10:



Figura 10 - Placa de 3 castanhas utilizada para fixação das peças

### 3.1 Material do corpo de prova

O material utilizado nos ensaios é o Aço AISI D6 que é muito utilizado na confecção de moldes para plásticos e estampos. O aço AISI D6 é um aço para trabalho a frio com elevada fração de carbonetos e elevada dureza após o tratamento térmico. Estas características conferem a este aço uma elevada resistência ao desgaste. Sua composição química padrão é listada na tabela 3:

Tabela 3: - Composição química do aço AISI D6 (VILLARES METALS, 2009).

C	Cr	W	V
<b>2,10</b>	<b>11,5</b>	<b>0,70</b>	<b>0,15</b>

Conforme Villares Metals (2009) o aço AISI D6 é um aço-liga similar ao VC 131 e possui como principais características alta estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste, especialmente em condições abrasivas. Sua elevada dureza o torna especialmente adequado para aplicações de severo desgaste como em operações de conformação e corte a frio, em superfícies deslizantes e moldes para materiais cerâmicos. É utilizado em ferramentas de corte como facas, matrizes,

punções, tesouras, em escariadores, mandris, feiras de trefilação, calibres, etc (GGD Metals, 2014).

### 3.2 Preparação dos corpos de prova e eletrodos

As superfícies dos corpos de prova foram fresadas e retificadas. Os eletrodos são de cobre e foram obtidos através de uma barra sextavada de 3/8". As faces dos eletrodos antes de serem submetidas aos ensaios foram torneadas e submetidas a um procedimento de polimento na politriz no laboratório de materiais da UTFPR – Campus Curitiba fazendo com que as mesmas possuam rugosidade similar a fim de evitar grandes distorções nos resultados experimentais. A máquina utilizada é mostrada na fig. 11.



**Figura 11 - Politriz utilizada na atividade experimental**

Os eletrodos primeiramente foram lixados com uma lixa 600 e depois com uma lixa 1200 para posterior polimento utilizando-se óxido de alumínio como material abrasivo.

Uma ressalva importante que deve ser feita é que com o intuito de controlar o desgaste do eletrodo durante a experimentação os parâmetros de controle devem ser muito bem escolhidos para não induzir à interpretações ambíguas de resultados durante a análise da rugosidade.

No decorrer do experimento os parâmetros de controle são variados de acordo com o planejamento experimental e a superfícies são então erodidas. Na figura 12 é

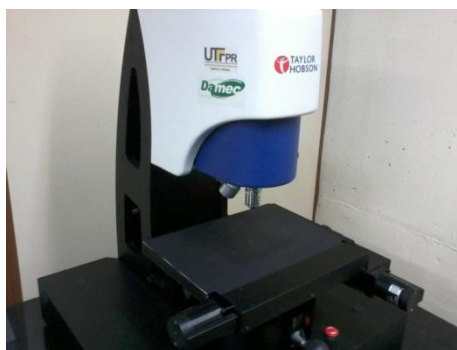
mostrada uma disposição preliminar do corpo de prova e do eletrodo em relação à máquina.



**Figura 12 - Montagem experimental**

### **3.3 Medição da rugosidade**

Com o objetivo de analisar todos os aspectos citados anteriormente, ou seja, a dependência da rugosidade das superfícies erodidas com os parâmetros de entrada é fundamental a medição dos parâmetros de rugosidade 3D (parâmetros de saída) através de um perfilômetro 3D que se baseia em interferometria óptica. O equipamento que é utilizado para este fim é mostrado na figura 13.



**Figura 13 - Rugosímetro 3D - Taylor Hobson CCI MP**

Após a realização do procedimento de eletroerosão das superfícies, estas são submetidas à análise, que indicará os parâmetros de rugosidade para cada situação em questão. Com a obtenção dos dados é realizada a análise principal que é a obtenção do parâmetro de banda  $\alpha$  e a posterior interpretação dos resultados.

Na preparação da amostra foram escolhidos alguns parâmetros de usinagem adequados para a constituição do experimento. Tais parâmetros foram previamente testados na máquina de eletroerosão com o intuito de prevenir futuros problemas que dificultassem o andamento da atividade experimental. Os parâmetros escolhidos são mostrados na tabela 3.

### 3.4 Parâmetros de controle

De acordo com a tabela 4 foram realizadas as usinagens na amostra ( AISI D6 temperado) que é mostrada na figura 14 e em seguida encaminhadas para a análise no perfilômetro 3D obtendo-se assim os parâmetros de rugosidade necessários para o cálculo do parâmetro de banda  $\alpha$ . O valor de  $\alpha$  foi calculado através das equações 2.5; 2.9; 2.10 e 2.11 e seus valores médios computados.

Tabela 4: Parâmetros de controle utilizados na usinagem da amostra

Grupos	Parâmetros de controle			
	Corrente (A)	Ton( $\mu$ s)	Toff( $\mu$ s)	GAP(mm)
1	1,5	4	2	0,08
2	2,5	4	2	0,1
3	3,0	5	3	0,11
4	5,0	5	3	0,14
5	6,5	5	3	0,13

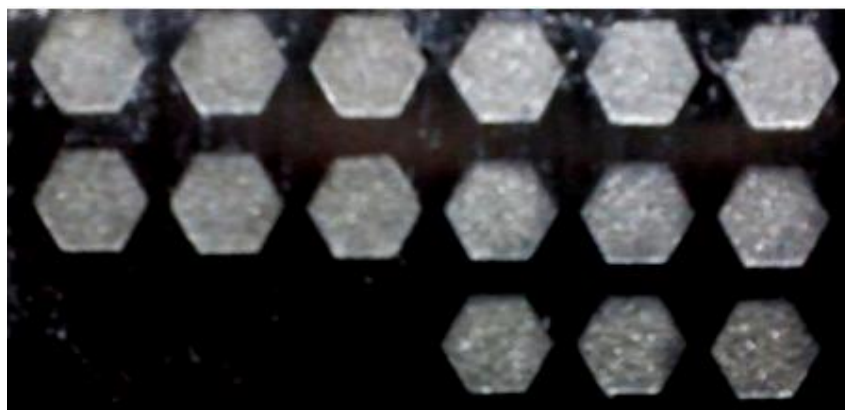
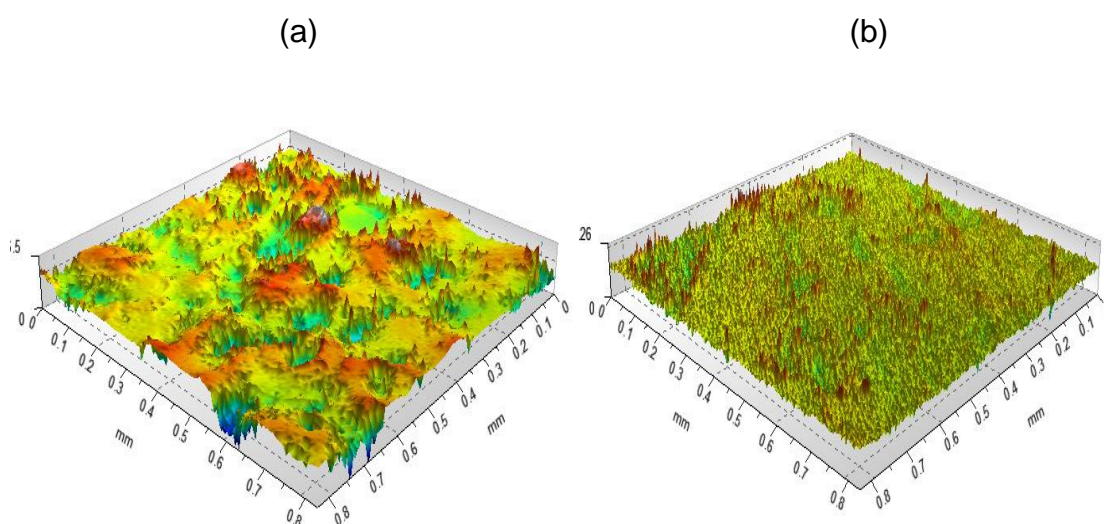


Figura 14 - Disposição das amostras (AISI - D6)

## 4 RESULTADOS

A análise da rugosidade 3D foi realizada no perfilômetro Taylor Hobson CCI MP no Laboratório de Metrologia da UTFPR – Campus Curitiba. Na figura 15 são mostradas algumas superfícies geradas pelo aparelho



**Figura 15 - Superfícies geradas no perfilômetro 3D: a) amostra; b) eletrodo.**

Com a avaliação visual das superfícies geradas através dos picos e vales na figura 15 fica evidente que a qualidade superficial das superfícies erodidas são bem inferiores quando comparadas com as superfícies polidas dos eletrodos.

Os valores obtidos diretamente no perfilômetro 3D para os parâmetros de rugosidade, bem como os erros associados à medição para cada grupo e para os valores médios do parâmetro de banda  $\alpha$  são mostrados na tabela 5:

Tabela 5: Parâmetros de rugosidade médios e  $\alpha$  médios para a amostra

Grupos	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Sa ( $\mu\text{m}$ )	Sq ( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds ( $\text{mm}^{-2}$ )	$\alpha$
1	2,49 $\pm$ 0,26	4,39 $\pm$ 0,05	5,95 $\pm$ 0,12	3,32 $\pm$ 0,28	17048 $\pm$ 2012	1,8
2	4,04 $\pm$ 0,42	5,99 $\pm$ 0,18	8,69 $\pm$ 0,24	6,4 $\pm$ 0,32	20656 $\pm$ 78	1,25
3	4,44, $\pm$ 0,67	7,47 $\pm$ 0,41	9,56 $\pm$ 0,57	6,68 $\pm$ 0,98	21853 $\pm$ 927	1,59
4	6,81 $\pm$ 0,1	9,33 $\pm$ 0,28	11,83 $\pm$ 0,45	8,88 $\pm$ 0,51	23688 $\pm$ 131	1,38
5	6,95 $\pm$ 0,1	10,7 $\pm$ 0,11	13,26 $\pm$ 0,14	9,71 $\pm$ 0,15	24660 $\pm$ 160	1,5

Com relação aos valores obtidos nas amostras pode-se observar que para os 5 grupos foi realizada a análise estatística que mostra o erro experimental para as 3 medições realizada em cada grupo. Os valores dos parâmetros de rugosidade encontrados estão compatíveis quando comparado com o trabalho de T.Y.Lin et al. Os parâmetros de banda médios ( $\alpha$ ), apesar de apresentarem certa flutuação também estão de acordo com a bibliografia encontrada, pois tal parâmetro é dependente dos parâmetros de rugosidade medidos. Na figura 16 são mostradas as variações das medições em torno da média para Sa

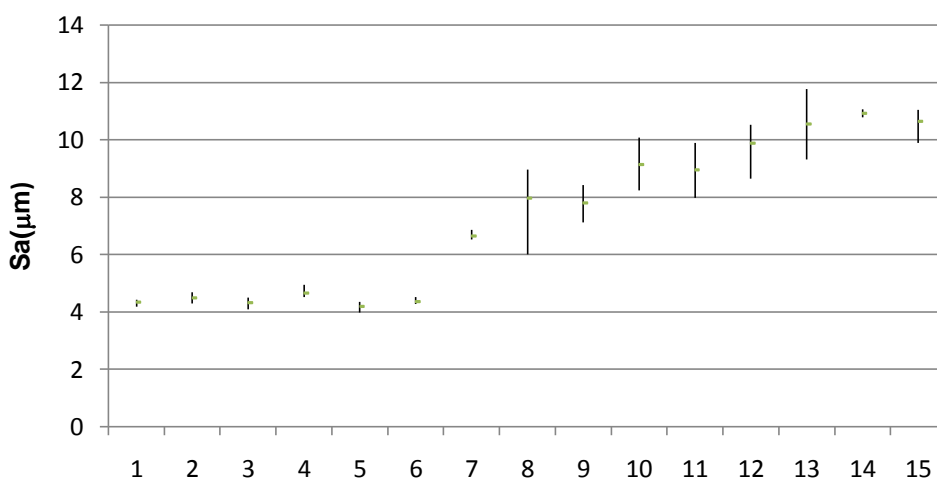
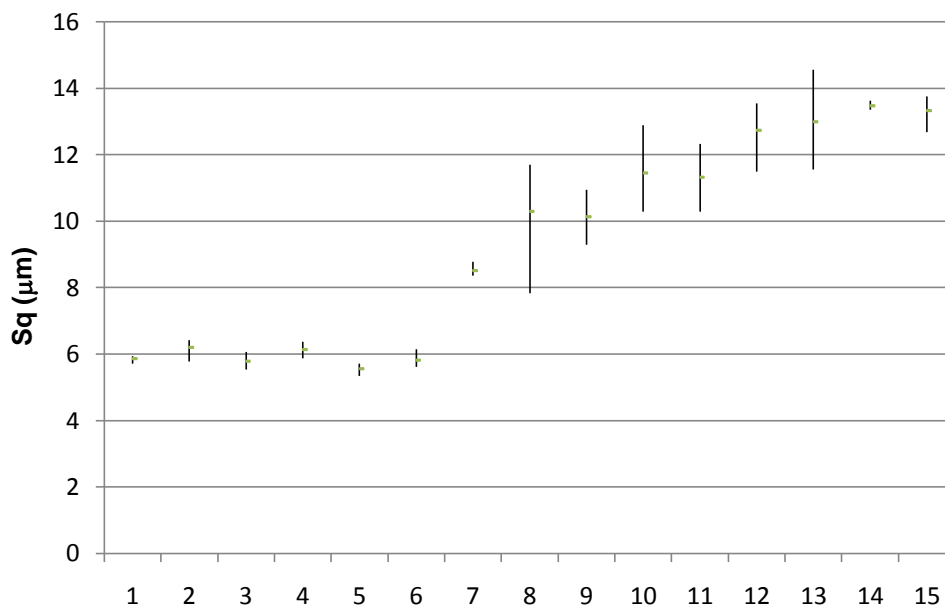


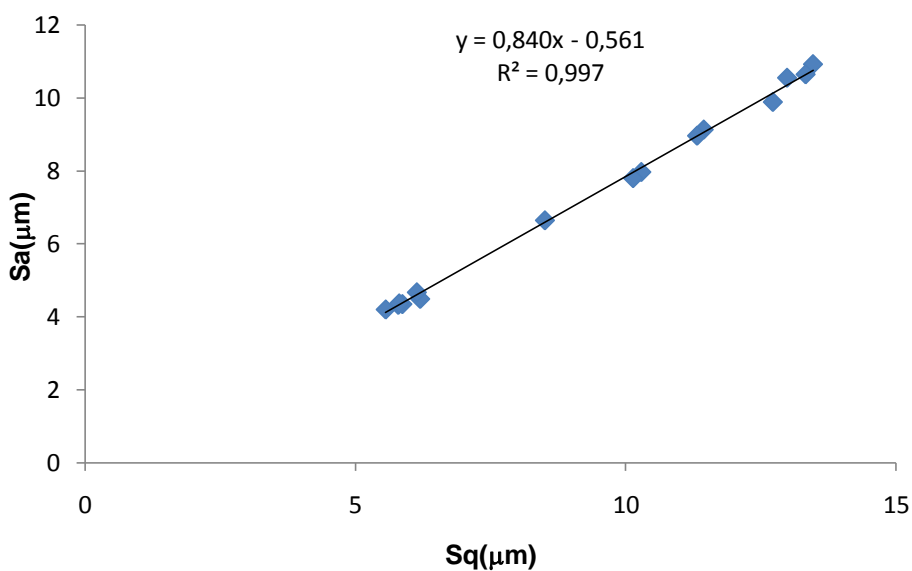
Figura 16 - Variação de Sa em torno da média (amostra)

A figura 17 mostra a variação das medições para Sq



**Figura 17 - Variação de Sq em torno da média (amostra).**

Pode-se observar com relação às informações contidas nas figuras 16 e 17 uma proporcionalidade entre os valores obtidos para os parâmetros de rugosidade Sq e Sa. Esta relação entre as medições está relacionada com a distribuição normal (Gaussiana). No figura 18 é mostrada a dependência entre as duas variáveis:



**Figura 18 - Relação entre Sa e Sq (amostra)**



Observa-se a dependência linear entre as duas grandezas, o coeficiente angular recomendado para concluir que a distribuição das asperezas é gaussiana segundo Krundak *et al.*(2008) deve ser igual à 1,2536 observa-se então uma certa discrepância com o resultado teórico previsto.

Nas figuras 19 e 20 são mostradas as variações das medições em relação à média para outros parâmetros de rugosidade analisados: Sdq e Sds.

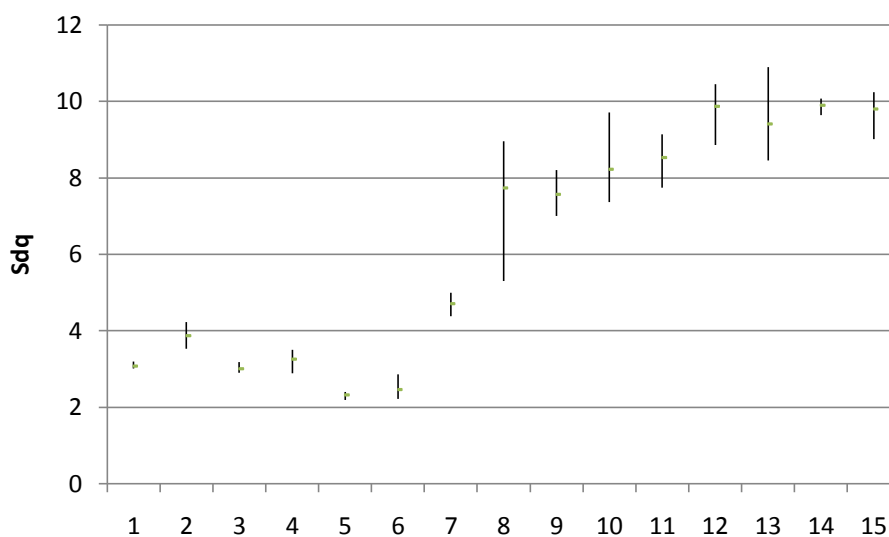


Figura 19 - Variação de Sdq em torno da média (amostra)

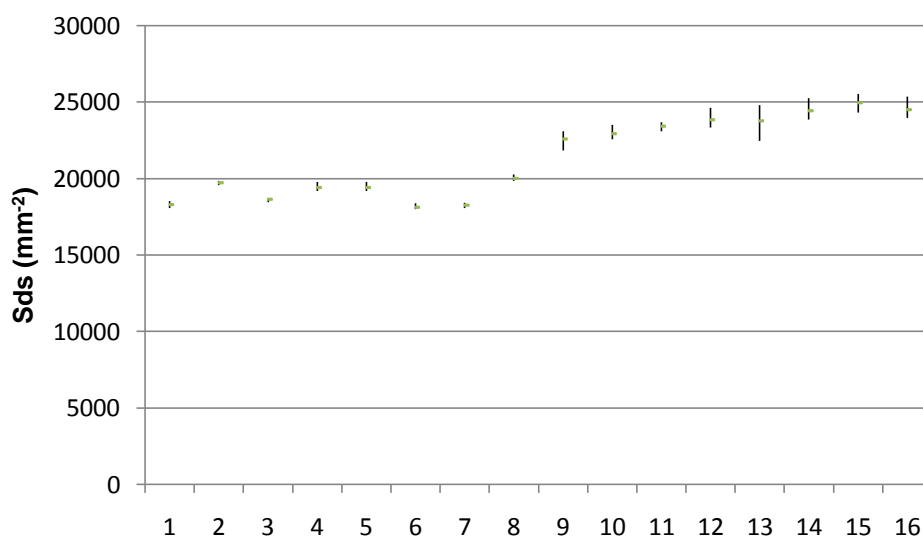


Figura 20 - Variação de Sds em torno da média (amostra)

Através da análise das figuras 16,17,19 e 20 nota-se uma certa similaridade da dispersão das medidas em relação à média, apesar da média entre elas serem diferentes.

A mesma análise estatística foi realizada para os eletrodos, a única diferença é que neste caso todas as 15 faces dos eletrodos foram submetidas ao mesmo processo de usinagem e acabamento (torneamento com posterior polimento).

Utilizou-se na análise experimental 8 eletrodos sextavados de cobre totalizando um total de 16 faces.

Para a análise dos valores médios foram utilizados 16 faces dos eletrodos, sendo que uma das faces serviu para testes na máquina de eletroerosão com o intuito de analisar se os parâmetros escolhidos seriam adequados para a análise experimental. Os valores médios para os parâmetros de rugosidade e para o valor de alfa ( $\alpha$ ) são mostrados na tabela 6:

**Tabela 6: Valores médios para os parâmetros de rugosidade e alfa (eletrodo)**

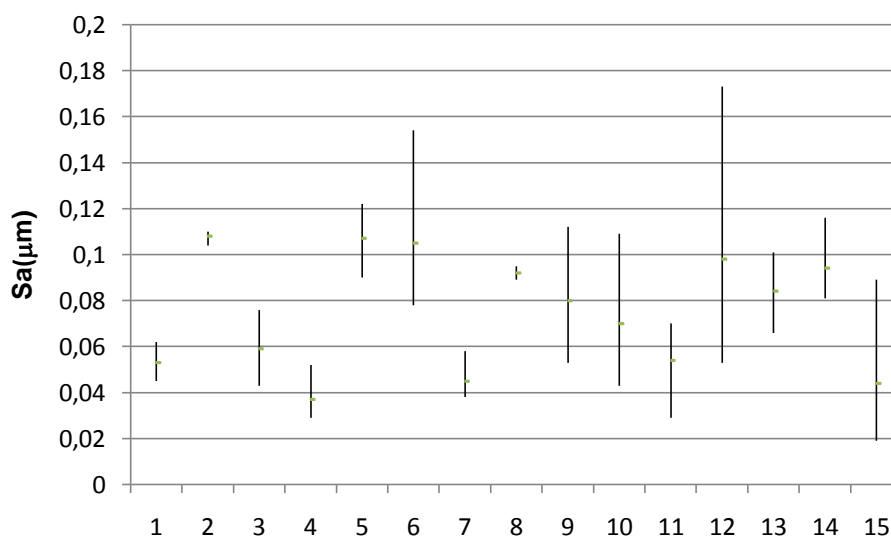
<b>Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Sa (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Sq (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Sdq</b>	<b>Sds (<math>\text{mm}^{-2}</math>)</b>	<b><math>\alpha</math></b>
0,059 $\pm$ 0,006	0,075 $\pm$ 0,006	0,096 $\pm$ 0,01	0,059 $\pm$ 0,009	12320 $\pm$ 1238	1,58

Com relação à tabela 6 observa-se que os valores dos parâmetros de rugosidade medidos são bem menores se comparados com os parâmetros obtidos na amostra (tabela 5), isto já era de se esperar, pois os eletrodos foram todos polidos antes de serem realizadas as medidas no perfilômetro, já com as amostras o acabamento propiciado através do processo de eletroerosão por penetração, mesmo em correntes relativamente pequenas, não fornece uma rugosidade que possa ser comparada a um acabamento polido.

Os valores obtidos para os parâmetros de rugosidade e para os valores de alfa ( $\alpha$ ) são mostrados em detalhes nos Apêndices A e B.

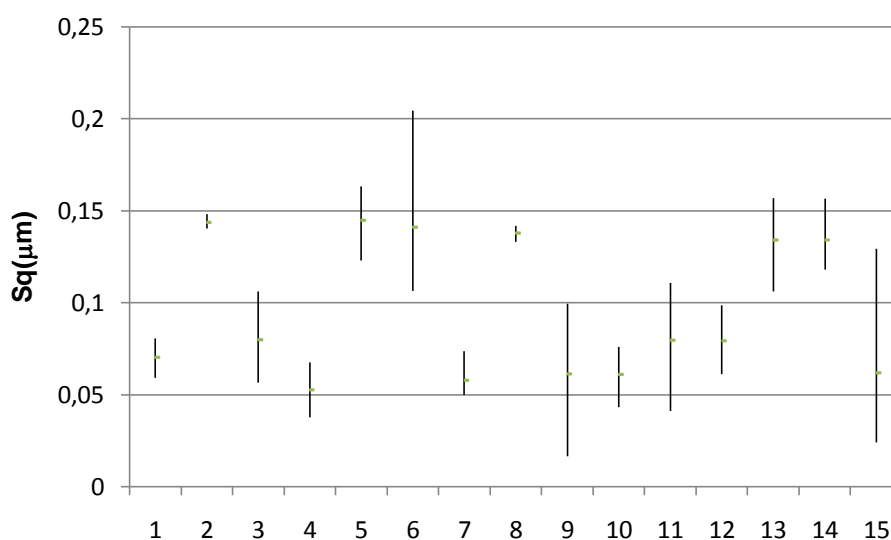
Na figura 21 são mostradas as dispersões das medidas em torno da média para o parâmetro Sa, para as 3 medições realizadas em cada face do eletrodo, considerando que na tabela 5 as medidas correspondem a uma média das medições

em cada eletrodo. Os valores das medições realizadas encontram-se melhor detalhadas no Apêndice A



**Figura 21 - Variação de Sa em torno da média (eletrodo)**

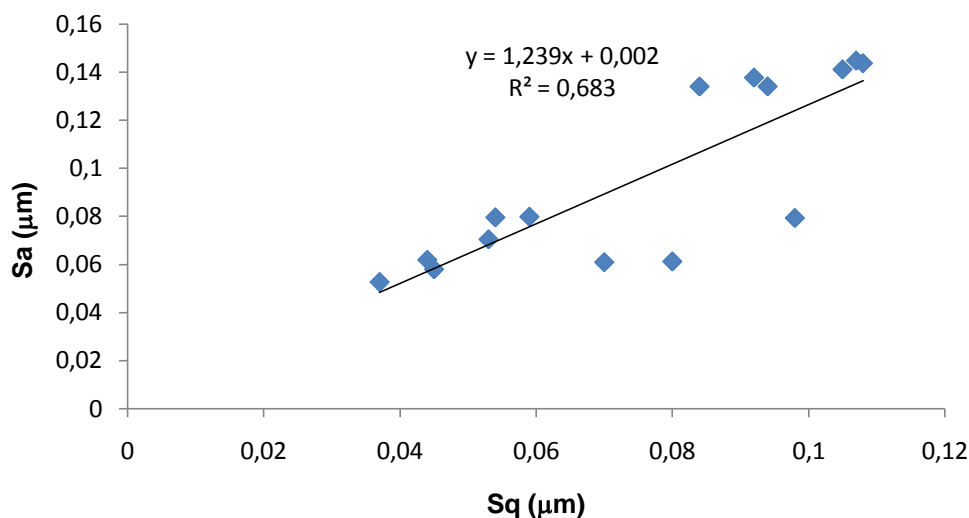
Na figura 22 são mostradas as medições e suas flutuações em torno da média



**Figura 22 - Variação de Sq em torno da média (eletrodo)**

Novamente é observado uma certa proporcionalidade entre as medições de Sa e Sq, assim como aconteceu com a amostra, quanto à dispersão dos valores

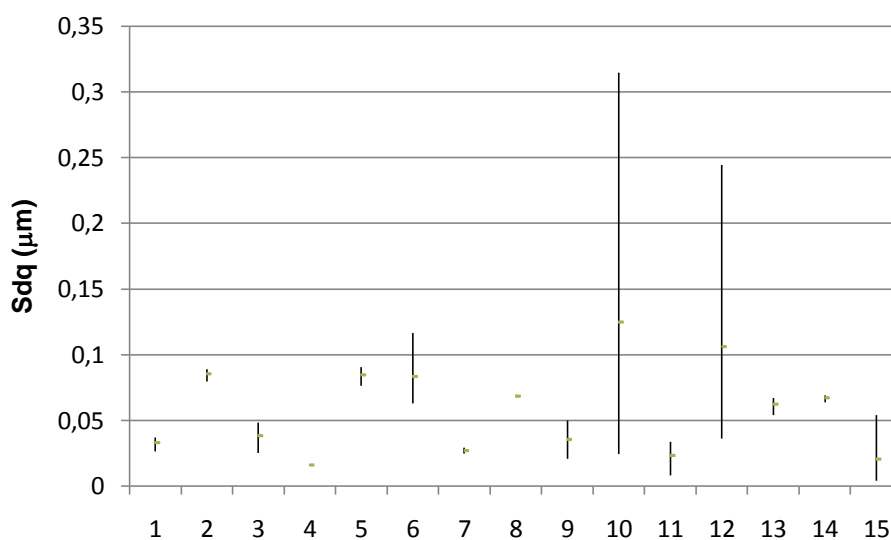
medidos no eletrodo foi muito maior quando comparado aos valores da amostra. Através da figura 23 pode-se verificar a dependência matemática entre as grandezas



**Figura 23 - Relação entre Sa e Sq (eletrodo)**

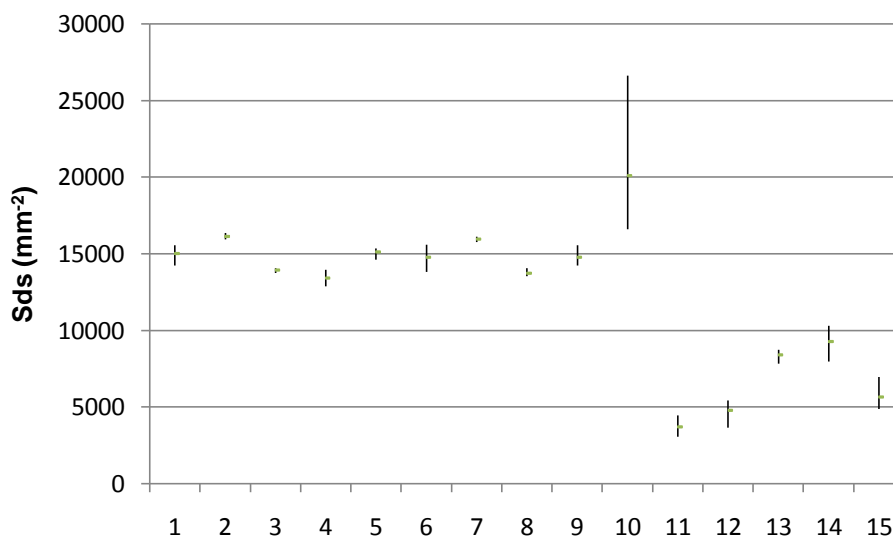
Apesar da dispersão dos dados ser bem maior nas medidas no eletrodo comparados com a amostra, fato que fica claro na análise dos gráficos anteriores constata-se que a linearização dos pontos fornece um coeficiente angular que é muito próximo do proposto por Krundak *et al.*(2008) para justificar a distribuição Normal ou Gaussiana, fato este que não foi comprovado com exatidão na análise dos dados da amostra.

Por fim as figuras 24 e 25 mostram o comportamento dos dados obtidos em relação à media para os parâmetros de rugosidade Sdq e Sds para o eletrodo.



**Figura 24 - Variação de Sdq em torno da média (eletrodo)**

Na figura acima pode-se observar um desvio muito grande com relação às medições 10 e 12 o que é atribuído a algum tipo de falha no procedimento experimental.



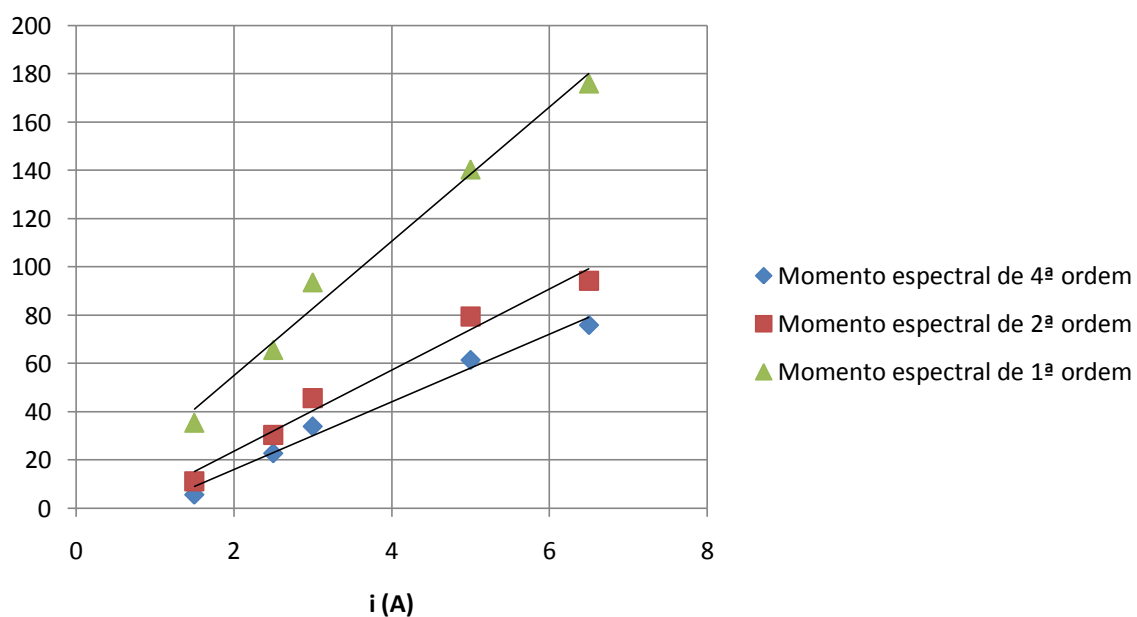
**Figura 25 - Variação de Sds em torno da média (eletrodo)**

Quanto à avaliação do parâmetro de banda alfa ( $\alpha$ ) para as amostras os dados são mostrados na tabela 7:

**Tabela 7: Momentos espectrais médios e  $\alpha$  médios (amostra)**

Grupos	$M_0$	$M_2$	$M_4$	$\alpha$
1	35,55	11,17	6,34	1,8
2	75,55	41,14	27,75	1,25
3	93,68	45,61	33,91	1,52
4	140,4	79,38	61,41	1,37
5	175,98	94,23	75,89	1,50

Os valores dos momentos espectrais de 1ª ordem ( $M_0$ ), de segunda ordem ( $M_2$ ) e de quarta ordem ( $M_4$ ) aumentam de acordo com a mudança do grupo de parâmetros, um dos parâmetros relevante em cada grupo é o valor da corrente elétrica ( $i$ ), em outras palavras, os momentos espectrais aumentam de acordo com o valor da corrente. Este aumento é melhor detalhado na fig.26



**Figura 26 - Momentos espectrais em função da corrente**

A variação dos valores de  $\alpha$  para a amostra são mostrados na figura 27:

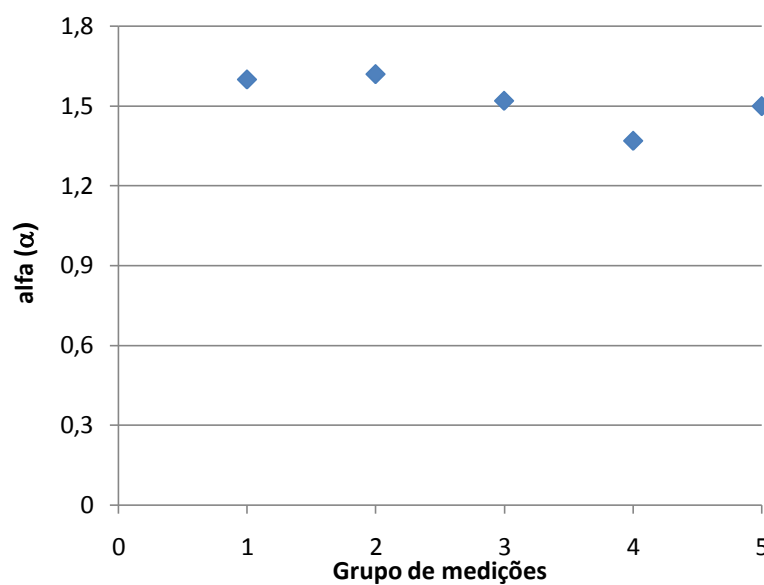


Figura 27 - Valores médios de  $\alpha$  para a amostra

A variação dos valores de  $\alpha$  para o eletrodo são mostrados na figura 28:

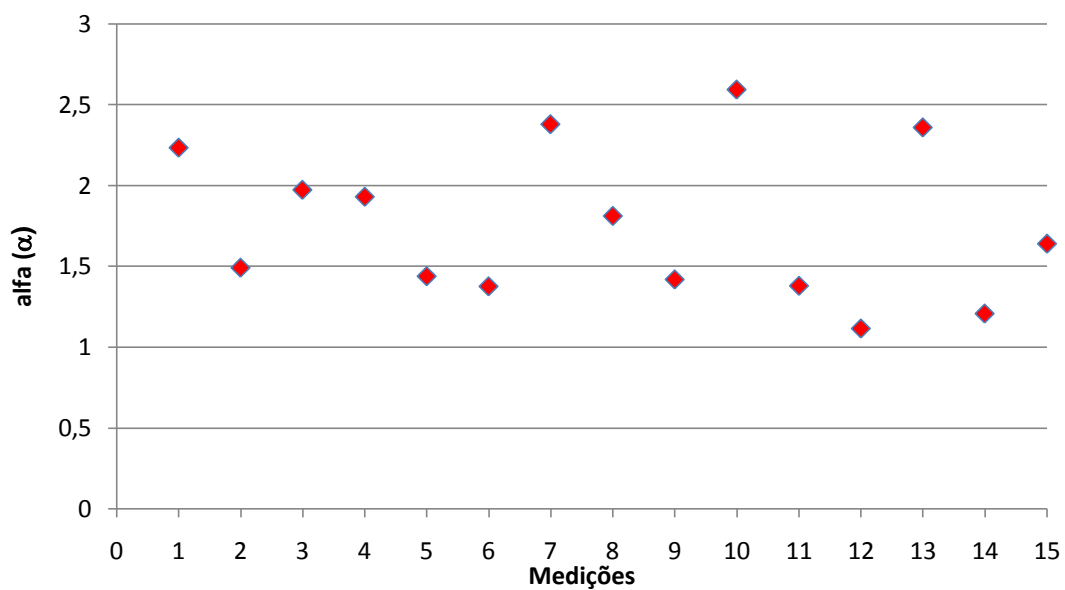


Figura 28 - Valores médios de  $\alpha$  para o eletrodo





## 6 CONCLUSÕES

No presente trabalho de pesquisa o intuito foi analisar os parâmetros de rugosidade de uma superfície erodida e buscar uma relação de valores para o parâmetro de banda ( $\alpha$ ) de acordo com o processo de fabricação utilizado e os parâmetros de controle adotados.

No que tange aos parâmetros de rugosidade medidos os valores estão próximos ao que a bibliografia (LIN, T.Y.; BLUNT, L.; STOUT, K.J., 1993) e a teoria presumem, com algumas discrepâncias inerentes ao procedimento experimental.

Com relação aos valores encontrados para o parâmetro de banda ( $\alpha$ ) foram observados alguns problemas na amostra. Para a amostra era esperado um crescimento dos valores de  $\alpha$  para cada grupo analisado, mas o que foi observado foi uma variação não linear dos valores, apesar disto, em outras bibliografias pesquisadas o mesmo problema foi observado. Quanto aos valores do parâmetro  $\alpha$  para o eletrodo o esperado era que os valores permanecessem constantes ou variando pouco em torno de uma média e isto foi comprovado experimentalmente.

Em outros trabalhos (AMARAL, 2013) no qual o parâmetro alfa também foi obtido foram encontrados valores para superfícies retificadas (tabela 2) que diferem em torno de uma ordem de grandeza com relação aos valores obtidos no presente trabalho para superfícies erodidas, o que era esperado, pois o valor do parâmetro alfa depende do processo de usinagem adotado e dos parâmetros escolhidos.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o que foi pesquisado e estabelecido nesta proposta o projeto de pesquisa sobre o tema é viável e muito útil no que diz respeito à aplicações tecnológicas no âmbito dos processos de eletroerosão.

Justifica-se o empenho e dedicação no trabalho pois não visa apenas a pesquisa científica em si, mas principalmente um meio para cooperar com o desenvolvimento deste processo de usinagem, que apesar de não ser muito difundido é de extrema importância quando se fala em usinagem de materiais de alta dureza e alta resistência à abrasão como metais duros e aços ferramentas.

Como sugestão para trabalhos futuros salienta-se a oportunidade para a medição do parâmetro alfa ( $\alpha$ ) para superfícies brunidas e ou lapidadas que são processos de usinagem muito úteis e de aplicação tecnológica em expansão.

## REFERÊNCIAS

ABOUELATTA, O.; **3D Surface Roughness Measurement Using a Light Sectioning Vision System**, Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol I, London UK.

AMARAL, P. ; TAKEHARA, G. **Análise estatística da rugosidade 3D obtida de superfícies retificadas**. IV MOPP – Mostra de Pesquisa e Pós-Graduação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

AMARAL, Pedro Luiz. **Influência da pressão nominal de contato no coeficiente de atrito estático em plano inclinado automatizado**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013.

ARANTES, Luciano J. **Avaliação do desempenho de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia. 2010.

BARCHEKY, BYMARA e AMORIM – **Apostila IBH 50 A - ENGEMAC**, 1988.

BENEDICT, Gary, F. **Nontraditional manufacturing processes**. Marcel Dekker. New York. 1987.

BODZIAK, Sabrina. **Estudo do microfresamento aplicado à indústria de moldes e matrizes como alternativa à usinagem por eletroerosão**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Tupy. 2011.

COSTA, Augusto et al. **Análise da influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial tridimensional no processo de eletroerosão por penetração do aço ferramenta AISI D6 temperado e revenido**. Interscienceplace, Revista Científica Internacional 12p. 10.6020. 2011.

DELEANU, Lorena et. al. **Influence of measurements on 3d roughness parameters**. Mechanical Testing and Diagnosis ISSN 2247 – 9635, 2011 (I), Volume 1, pg 42-53.

DONG, W.P., SULLIVAN, P.J. and STOUT, K.J., **Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography IV:Parameters for characterising spatial and hybrid properties**, Wear, 178, p.45-60,1994.

DONG, W.P., SULLIVAN, P.J., STOUT, K.J., **Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties**, *Wear*,178, p.29-43,1994.

FACCIO, Ian. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2003.

FREITAS, Enio da S. R. **Parâmetros Topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. 2006.

GUITRAU, E. P. **The EDM Handbook**. Hansen Gardner Publications. Cincinnati , OH. 1997. 306p.

KANLAYASIRI, K. ; BOONMUNG, S. **An investigation on effects of wire-EDM machining parameters on surface roughness of newly developed DC53 die steel**. *Journal of Materials Processing Technology* 187 -188. 29p. 2007

KLOCKE, Fritz., KÖNIG, Wilfried. **Fertigungsverfahren 3 - Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung**, Springer Verlag, 4. Auflage, 2007.

KRUNDRAK, J., GYANI, K.; BANA, V., **Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 38, p. 110–119, 2008.

LIN, T.Y.; BLUNT, L.; STOUT, K.J. **Determination of proper frequency bandwidth for 3D topography measurement using spectral analysis. Part I: isotropic surfaces**. *School of Manufacturing and Mechanical Engineering, The University of Birmingham* 166 (1993) pg 221 – 232.

MACHADO, Adriane. **Avaliação da rugosidade em superfícies complexas**. 2009. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Tupy. 2014.

MCCOOL, J.I., **Comparison of Models For The Contact of Rough Surfaces**, Vol. 107, p.37 – 60, 1986.

MCCOOL, J.I., **Relating Profile Instrument Measurements to the Functional Performance of Rough Surfaces**, Tribology Division of the American Society of Mechanical Engineers-ASME, Vol. 109, p. 264-270, 1987.

MONTAÑEZ CALAO, Luis Fernando. **Coefficiente de atrito estático do par aço AISI H13 temperado e revenido e recobrimento de cromo duro: ensaios em plano inclinado**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.

PIRATELLI, A; **3º Seminário de Metrologia**. 2011. Universidade de Brasília

RAMASAWMY, H. ; BLUNT, L. **Effect of EDM process parameters on 3D surface topography**. Journal of Materials Processing Technology 148. pg 155-164. 2004

SANTOS, Irapuan. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio TI-6AL-4V**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.

SCHMÄHLING, J.; HAMPRECHT, F. A.; HOFFMANN, D.M.P. **A three-dimensional measure of surface roughness based on mathematical morphology**. Technical Report from Multidimensional Image Processing, IWR, University of Heidelberg 14p.2006.

SCHMIDT, Igor; SABO, Sarita C. **Usinagem por eletroerosão**. 2008. Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia universidade Católica do Estado do Rio Grande do Sul, 21p. 2008.

STOUT K. J., J. DAVIS, **The specification of surface finish tolerance for the control of manufacture of engineering surfaces** Wear, v.109,181-193, 1986.

STOUT, K.J., SULLIVAN, P.J., DONG, W.P., MAINSAH, E., LUO, N., MATHIA, T., ZAHYOUANI, H., **The Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions**, 1993.

WEINGAERTNER, Walter L. **Tecnologia de fabricação volume 3**. Material didático da disciplina EMC 6316. POSMEC. UFSC. Florianópolis. 1996 - 98. 301p.

## APÊNDICE A – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE PARA OS GRUPOS

**Tabela 8: Parâmetros de rugosidade - Grupo 1**

Amostras	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Sa( $\mu\text{m}$ )	Sq( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds( $\text{mm}^{-2}$ )
1	1,742	4,434	5,942	3,015	18521
	2,5	4,19	5,714	3,198	18339
	2,168	4,43	5,943	3,013	18064
2	2,115	4,294	5,784	3,527	19562
	2,719	4,491	6,418	4,228	19763
	2,168	4,696	6,386	3,865	19859
3	2,877	4,087	5,531	2,934	18741
	4,085	4,505	6,062	3,182	18440
	2,04	4,4	5,778	2,909	18741

**Tabela 9: Parâmetros de rugosidade - Grupo 2**

Amostras	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Sa( $\mu\text{m}$ )	Sq( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds( $\text{mm}^{-2}$ )
4	2,111	4,516	6,152	3,502	19767
	4,633	6,83	9,848	7,226	21313
	5,507	6,398	9,098	7	21161
5	5,119	7,153	10,32	8,008	21228
	4,341	5,997	8,799	6,813	20671
	4,758	5,812	8,361	6,196	20267
6	4,27	5,759	8,286	6,151	20422
	1,9	5,304	8,021	5,609	20223
	3,694	6,116	9,283	7,03	20856

Tabela 10: Parâmetros de rugosidade - Grupo 3

Amostras	Ra( $\mu\text{m}$ )	Sa( $\mu\text{m}$ )	Sq( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds( $\text{mm}^{-2}$ )
7	2,354	6,55	8,376	4,39	20266
	3,679	6,524	8,367	4,754	19909
	4,857	6,86	8,775	4,999	19863
8	7,459	8,958	11,34	8,958	23081
	5,737	8,942	11,7	8,953	22830
	4,156	6,003	7,832	5,309	21846
9	5,083	7,857	10,18	7,52	23502
	3,35	7,127	9,286	7,002	22809
	3,292	8,417	10,95	8,21	22573

Tabela 11: Parâmetros de rugosidade - Grupo 4

Amostras	Ra( $\mu\text{m}$ )	Sa( $\mu\text{m}$ )	Sq( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds( $\text{mm}^{-2}$ )
10	7,768	10,08	12,89	9,715	23690
	6,803	8,242	10,29	7,591	23523
	5,235	9,068	11,16	7,374	23078
11	6,739	9,888	12,33	9,135	23639
	7,249	9,007	11,35	8,741	24615
	6,71	7,988	10,29	7,741	23326
12	8,744	10,48	13,54	10,45	24032
	7,169	8,656	11,49	8,864	22483
	4,854	10,52	13,15	10,31	24806

Tabela 12: Parâmetros de rugosidade - Grupo 5

Amostras	Ra( $\mu\text{m}$ )	Sa( $\mu\text{m}$ )	Sq( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds( $\text{mm}^{-2}$ )
13	5,211	9,324	11,56	8,458	23874
	7,492	10,55	12,86	8,866	24267
	7,568	11,77	14,55	10,9	25265
14	5,529	11,07	13,63	9,649	24325
	8,583	10,78	13,42	10,08	25520
	7,204	10,91	13,36	9,977	25086
15	7,09	11	13,75	10,24	24266
	7,064	9,885	12,68	9,015	23960
	6,777	11,04	13,57	10,16	25378



Tabela 13: Parâmetros de rugosidade - Eletrodo

Amostras	Ra( $\mu\text{m}$ )	Sa( $\mu\text{m}$ )	Sq( $\mu\text{m}$ )	Sdq	Sds( $\text{mm}^2$ )
1	0,039	0,053	0,070	0,033	15019
2	0,089	0,108	0,144	0,085	16136
3	0,050	0,059	0,080	0,038	13917
4	0,033	0,037	0,048	0,023	13586
5	0,099	0,107	0,144	0,084	15097
6	0,092	0,105	0,141	0,027	14768
7	0,032	0,045	0,058	0,069	15934
8	0,068	0,092	0,138	0,036	13719
9	0,054	0,080	0,061	0,031	14764
10	0,029	0,070	0,061	0,023	20092
11	0,044	0,054	0,080	0,030	3695
12	0,046	0,098	0,1341	0,046	4765
13	0,063	0,084	0,145	0,067	8391
14	0,089	0,094	0,062	0,021	9252
15	0,073	0,044	0,089	0,033	11278

## APÊNDICE B – MOMENTOS ESPECTRAIS E PARÂMETROS DE BANDA ( $\alpha$ )

Tabela 14: Momentos espectrais e alfa ( $\alpha$ ) para a amostra

GRUPOS	$M_0$	$M_2$	$M_4$	$\alpha$
1	34,42	9,46	5,65	2,17
	38,39	15,00	9,66	1,65
	33,35	9,05	5,51	2,25
2	69,99	35,12	23,79	1,35
	83,91	49,07	33,20	1,16
	72,76	39,30	26,26	1,24
3	72,35	22,22	14,52	2,12
	105,90	59,91	44,18	1,3
	102,79	57,42	43,04	1,34
4	131,03	67,68	51,77	1,48
	128,22	72,91	56,8	1,37
	161,97	97,51	75,68	1,29
5	168,74	88,51	70,71	1,53
	181,44	98,05	79,96	1,51
	177,78	96,14	77,01	1,48

Tabela 15: Momentos espectrais e alfa ( $\alpha$ ) para o eletrodo.

GRUPOS	$M_0$	$M_2$	$M_4$	$\alpha$
1	0,004955	0,001087	0,000533	2,234095
2	0,020678	0,007309	0,00385	1,490575
3	0,00637	0,001467	0,000667	1,972513
4	0,002268	0,000521	0,000231	1,931868
5	0,020986	0,0072	0,003549	1,436828
6	0,019947	0,006989	0,00337	1,376116
7	0,003354	0,000733	0,000381	2,380769
8	0,018989	0,004699	0,002105	1,809955
9	0,00374	0,001272	0,000613	1,416894
10	0,003704	0,000936	0,000614	2,595335
11	0,006327	0,000554	6,68E-05	1,377349
12	0,006285	0,000878	0,000137	1,11358
13	0,017983	0,002088	0,000572	2,358945
14	0,017992	0,004502	0,00136	1,207258
15	0,003823	0,000431	7,97E-05	1,639172

