

2006

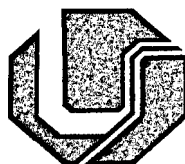
3-2

MOD
421
R1750
TESIMEM

DIRBI/UFU



1000189877



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO
ELETROQUÍMICA NA USINAGEM DO AÇO RÁPIDO ABNT M6

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

CARLOS ALBERTO DOMINGOS RAMOS ✍

Como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Aprovada por:

Prof. Dr. Claudionor Cruz	(UFU)	-	Orientador
Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi	(UNESP)		
Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva	(UFU)		



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila 2160 Campus Santa Mônica Uberlândia - MG 38408-100
Fone: 0342394149- FAX: 034 2394282

ALUNO: CARLOS ALBERTO DOMINGOS RAMOS

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5981614-4

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

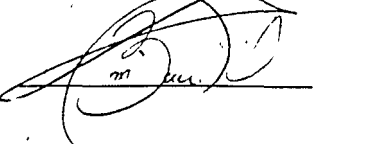
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

Estudo do Desempenho do Processo de Retificação Eletroquímica na Usinagem do Aço Rápido ABNT M6

ORIENTADOR: Prof. Dr. Claudionor Cruz

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1E do Campus Santa Mônica, em 05 de novembro de 1999, as 8 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Claudionor Cruz, Prof. Dr.	UFU	
Eduardo Carlos Bianchi, Prof. Dr.	UNESP	
Marcio Bacci da Silva, Prof. Dr.	UFU	

Uberlândia, 05 de novembro de 1999.

Às minhas filhas Maria Olívia e Ana Carla.

À minha esposa Jaqueline.

Aos meus pais Josias Ramos e Joaquina Domingos.

Ao meu senhor, por todas as graças recebidas.

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Claudionor Cruz pela orientação.
- Ao Departamento de Engenharia Mecânica e à coordenação do curso de Pós-Graduação pela oportunidade de realização deste trabalho.
- À Diretoria do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e Unidade Descentralizada de Araxá (Uned-Araxá) pela autorização para frequentar o curso de Pós-Graduação.
- Aos alunos, professores e demais servidores do CEFET-Uned pela compreensão durante minha ausência de Araxá.
- Aos professores do curso de Pós-Graduação pelos conhecimentos transmitidos.
- Ao Geraldino Martins, técnico do Laboratório de Usinagem Não Tradicional (UÑT) e colaboradores dos demais laboratórios pela ajuda prestada no decorrer do trabalho.
- Aos professores e técnicos do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), em especial aos professores Sinésio Domingues Franco e Alberto Arnaldo Raslam pela ajuda prestada.
- Ao colega João Cirilo da Silva Neto pela companhia e amizade.
- Aos companheiros Evaldo Malaquias, Luciano Antônio Fernandes, Jean Robert Pereira Rodrigues, Rafael Luiz Teixeira, Maurício Postal e ao professor Márcio Bacci da Silva pela valorosa colaboração e amizade.
- Aos demais colegas do curso pelo apoio.
- A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.
- A Winter do Brasil Ltda que gentilmente cedeu o rebolo de CBN.
- A todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

ESTUDO DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO ELETROQUÍMICA NA USINAGEM DO AÇO RÁPIDO ABNT M 6

SUMÁRIO

	Página
Capítulo 1 INTRODUÇÃO.....	1
Capítulo 2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PROCESSO DE USINAGEM POR RETIFICAÇÃO ELETROQUÍMICA	4
2.1 - Generalidades	5
2.2 - Fundamentos da Usinagem por Retificação Eletroquímica	9
2.3 - Fatores que Influem no Desempenho da Retificação Eletroquímica.....	17
2.4 - Desempenho do Processo de Usinagem por Retificação Eletroquímica	29
Capítulo 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	38
3.1 - A Máquina ECG	39
3.2 - Escolha dos Parâmetros de Entrada	45
3.3 - Procedimento Experimental	49
3.4 - Especificação do Par Ferramenta / Peça	51
3.5 - Resultados dos Processos de Usinagem por Retificação Eletroquímica e Superabrasiva	52
Capítulo 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	54
4.1 - Variáveis Dependentes do Processo (I,R,J).....	55
4.2 - Taxa de Remoção do Material	59
4.3 - Taxa de Remoção Específica do Material.....	61
4.4 - Aspectos Gerais da Superfície Usinada.....	62
4.5 - Acabamento Superficial	66
4.6 - Dureza Superficial	69
Capítulo 5 CONCLUSÕES	71
Capítulo 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXO I Resultados dos Ensaios de Usinagem.....	77
ANEXO II Resultados da Medição de Rugosidade e Dureza Vickers	79
ANEXO III Montagem para os Ensaios de Retificação.....	83

Ramos, C.A.D., 1999; *Estudo do desempenho do processo de retificação eletroquímica na usinagem do aço-rápido ABNT M6*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

RESUMO

Uma importante e significativa vantagem da usinagem por retificação eletroquímica (ECG) sobre a retificação convencional de materiais de elevada resistência mecânica está no aumento da taxa de remoção de material (TRM), mantendo um alto padrão na textura superficial sem alterar as propriedades mecânicas do material de forma significativa. Para analisar estes efeitos, o aço-rápido ABNT M6 foi usinado em uma operação de retificação tangencial de mergulho com a mesa parada, utilizando-se um equipamento de retificação eletroquímica obtido a partir de uma retificadora convencional. O desempenho do processo de usinagem por retificação eletroquímica foi estudado, e os resultados obtidos foram comparados com os da retificação convencional superabrasiva com rebolos de Nitreto de Boro Cúbico (CBN). Este trabalho analisou também os efeitos de algumas variáveis do processo, tais como a taxa do fluxo do eletrólito e a diferença de potencial aplicada ao par ferramenta-peça no acabamento superficial, no raio de arredondamento da superfície retificada e na dureza da referida superfície. Os resultados dos testes revelaram bom desempenho do processo ao confirmarem alguns resultados clássicos da literatura sobre o mesmo. Comprovou-se também que o processo ECG oferece algumas vantagens sobre o processo de retificação superabrasiva, principalmente no tocante a vários aspectos de qualidade da superfície usinada.

Palavras-chave: Retificação eletroquímica, retificação convencional superabrasiva, textura superficial e taxa de remoção de material.

Ramos, C.A.D., 1999; *Study of the performance of electrochemical grinding process in the machining of ABNT M6 high speed steel*, M Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

Abstract

An important and significant advantage of the electrochemical grinding process (ECG) over conventional grinding machining of hard-to-machined and high-strength materials, are the increase of material removal rate and better surface characteristics without changing mechanical properties of the material. To analyse these effects, high-speed steel ABNT M6 was machined by ECG process using tangential plunging grinding operation with stable table. The machine used was derived from a conventional grinding machine. It was used CBN grinding wheel. The performance of the operation was studied and the results compared with the conventional grinding process. This work also analysed the effects of some process variables, such as the electrolyte flow rate, the current density and the applied load on the supply source, upon surface roughness, nose radius and hardness of the machined surface. The findings indicated that the electrochemical-abrasive process was effective and show a tendency in decreasing surface roughness with the increase of metal removal rate.

Keywords: *Electrochemical grinding, surface texture, conventional grinding and metal removal rate*

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 - Necessidades que motivaram a criação e evolução dos Processos Não Tradicionais de Usinagem (NTM)[Cruz,1997].....	4
2.2 - Esquema simplificado do processo de retificação eletroquímica [Benedict,1987].....	6
2.3 - Pequeno arco de contato mecânico parcialmente responsável pela longa vida do rebolo no uso da ECG [Benedict,1987].....	8
2.4 - Esquema de uma célula eletrolítica com anodo de ferro.....	11
2.5 - Curvas de polarização anódica simplificadas do ferro e suas ligas para o NaCl (curva 1) e NaNO ₃ (curva 2) do processo ECM [Rumyantsev e Davydov, 1989].....	12
2.6 - As três fases da remoção de material por ECG.....	15
2.7 - Diagrama esquemático da retificação eletroquímica (ECG) [Kozak e Oczos, 1998].....	16
2.8 - Especificações a serem satisfeitas para alcançar condições ótimas de retificação [Bhattacharyya et al, 1984].....	17
2.9 - Fatores que influenciam os resultados da usinagem por ECG.....	19
2.10 - Inter-relação sistêmica dos parâmetros físico-químicos do processo ECG.....	20
2.11 - Razão g/a_n versus taxa de alimentação V_f para diferentes tensões de trabalho da fonte [Kozak e Oczos, 1998]	21

2.12 - Variação da distância entre o rebolo e a peça de trabalho (S) com o tempo de usinagem ECG: curva s - ferramenta estática, curvas t e r - velocidade de avanço constante [McGeough, 1988]	22
2.13 - Representação gráfica das curvas características de eficiência de corrente por densidade de corrente das soluções de NaCl e NaNO ₃ . [McGeough, 1988].....	26
2.14 - Condutibilidade elétrica versus concentração de eletrólitos utilizados na retificação eletroquímica (ECG). [Machining Data Handbook, 1980].....	28
2.15 - Inter-relação dos resultados do processo de usinagem por ECG....	29
2.16 - Regiões da interface rebolo-peça caracterizada por diferentes processos na usinagem por ECG [Geva et al, 1975].....	32
2.17 - Efeito da velocidade de alimentação da peça de trabalho (V_f) na rugosidade R_a [Kozak et al, 1998].....	34
2.18 - Variação da rugosidade em função da intensidade de corrente para diferentes aços [Marty, 1971]	35
2.19 - Efeito da densidade de corrente na microdureza da superfície usinada (eletrólito: solução aquosa de NaNO ₃ – 50 g/l. e NaNO ₂ – 10 g/l; material: Armco- curva 1, aço 3H13 – curva 2) [Kozak e Oczos, 1998].....	37
3.1 - Fluxograma das etapas de realização dos ensaios.....	39

3.2 - Esquema do circuito elétrico do equipamento	40
3.3 - Vista principal da fonte de potência incorporada à retificadora	41
3.4 - Circuito do eletrólito incorporado ao conjunto de retificação eletroquímico	42
3.5 - Esquema do circuito eletrolítico [Malaquias, 1996].....	43
3.6 - Retificadora hidráulica universal utilizada na obtenção da retificadora eletroquímica.....	44
3.7 - Vista da retificadora eletroquímica com os circuitos eletroquímico e elétrico incorporados através da cuba eletrolítica e porta-escovas respectivamente.....	45
3.8 - Esquema do posicionamento do fluxo do eletrólito, detalhando a distância do bico à superfície de trabalho do rebolo (τ) e o ângulo de inclinação do fluxo em relação à tangente desta superfície.....	47
4.9 - Fixação da peça na retificadora	49
3.10 - Esquema operacional dos ensaios experimentais de usinagem....	50
3.11 - Seqüência operacional dos ensaios experimentais de usinagem..	50
3.12 - Esquema da área de usinagem detalhando a configuração empregada nos ensaios.....	51
4.1- Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na intensidade de corrente	56
4.2 - Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na resistência elétrica do gap.....	57

4.3 - Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na densidade de corrente	58
4.4 - Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na Taxa de remoção do material (TRM)	59
4.5 - Correlação entre a TRM e a I	58
4.6 - Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na Taxa de Remoção específica de Material (TRM_e).....	61
4.7 - Aspectos das superfícies obtidas pelos processos de retificação eletroquímica (a) e superabrasiva (b) em uma ampliação aproximada de 10X.....	63
4.8 - Aspectos das superfícies obtidas pelos processos de retificação eletroquímica (a) e superabrasiva (b) em uma ampliação aproximada de 25X.....	64
4.9 - Aspectos das superfícies obtidas pelos processos de retificação eletroquímica (a) e superabrasiva (b) em uma ampliação aproximada de 30X.....	65
4.10 - Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na Taxa de Remoção Rugosidade R_a nos diferentes processos de retificação.....	67
4.11 - Tendência da rugosidade em relação à Taxa de remoção de material para os dois processos de retificação.....	68
4.12 - Detalhe da superfície após sofrer descargas elétricas em condições mais agressivas de usinagem ECG.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 - Caraterísticas da retificação convencional e da retificação eletroquímica.....	7
3.1 - Parâmetros utilizados nos ensaios.....	48
4.1 - Resultados dos ensaios de usinagem em barras de aço ABNT M6 com rebolo condutor de CBN.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

Al -Al ₂ O ₃	- Alumínio - Óxido de alumínio.
Al -SiC	- Alumínio - Carboneto de silício.
CBN	- Nitreto de Boro Cúbico.
ECG	- Retificação Eletroquímica – “Electrochemical Grinding”.
ECM	- Usinagem eletroquímica – “Electrochemical Machining”.
PCD-Co	- Diamante sintético policristalino - cobalto.
TRM	- Taxa de remoção de material (mm ³ /min).
TRM _e	- Taxa de remoção de material específica (mm ³ /min/100Amperes).

Símbolos

A	- Massa atômico dos elementos químicos da liga metálica da peça (g/mol).
a _n	- Profundidade de corte (mm).
E	- Diferença de potencial entre os eletrodos (V).
E _a	- Potencial elétrico dos elementos que constituem a liga metálica (V).
E _g	- Diferença de potencial entre os eletrodos requerido para a água iniciar sua decomposição (V).

E_2	-Diferença de potencial entre os eletrodos relativo ao início da dissolução do metal usinado para o eletrólito de NaNO_3 (V).
E_1	-Diferença de potencial entre os eletrodos relativo ao início da dissolução do metal usinado para o eletrólito de NaCl (V).
E_e	- Equivalente eletroquímico ($\text{g/mol } ^\circ\text{C}$).
e	- Carga elétrica (Coulomb).
F	- Constante de Faraday ($= 96500 \text{ C}$).
g	- Profundidade de corte abrasiva G+EC (segmento 1-2) (mm).
G	- Relação entre o volume de material da peça de trabalho removido pelo volume desgastado do rebolo.
h	- altura da saliência dos fragmentos dos grãos (μm).
I	- Intensidade de corrente elétrica (Ampères-A).
$I_{\text{lim } 1}$	- Valor limite da intensidade de corrente numa taxa máxima de dissolução de metal para o eletrólito de NaCl (Ampères-A).
$I_{\text{lim } 2}$	- Valor limite da intensidade de corrente numa taxa máxima de dissolução de metal para o eletrólito de NaNO_3 (Ampères-A).
J	- Densidade de corrente elétrica (A /cm^2).
K	- Número de fatores em estudo nos ensaios.
K_v	- Condutividade elétrica (A/ V.mm)
L_n	- Percorso de medição do rugosímetro (mm).
Q	- Vazão do eletrólito (l/h).

r_a	- Raio de arredondamento externo (mm).
r	- resistividade do eletrólito ($\Omega \cdot \text{cm}$).
R	- Raio do rebolo (mm).
R_a	- Rugosidade média aritmética (μm).
R_c	- Resistência do circuito (Ω - Ohm).
R_g	- Resistência do <i>gap</i> (Ω - Ohm).
S	- Distância entre a peça de trabalho e o rebolo – <i>gap</i> - (μm).
S_a	- Área de contato elétrico entre os eletrodos; perpendicular ao fluxo elétrico- (cm^2)
U	- Diferença de potencial da fonte de potência (V).
W	- Velocidade angular do rebolo (rpm).
V_e	- Velocidade de remoção do metal na usinagem eletroquímica (mm/min) [$V_e = \text{TRM}/S_a$].
V_g	- Velocidade crítica de avanço do elemento responsável pelo movimento (m/min).
V_f	- Velocidade de avanço do elemento responsável pelo movimento [mesa ou ferramenta](mm/min).
Z	- Valência do elemento químico da liga metálica.
Δt	- Tempo de usinagem (s).
ΔV	- Volume de material usinado (mm^3).

ρ	- Massa específica do material (Kg/m^3).
Δm	- Massa de material usinado (g).
τ	- Distância do bico ejetor à área de trabalho (mm).
α	- Ângulo de direcionamento do jato de eletrólito (graus).
λ_c	- Comprimento de onda limite que define a curva característica de filtragem "cut-off" (mm).
UÑT	- Logotipo do Laboratório de Usinagem não tradicional da Universidade Federal de Uberlândia.

Capítulo 1

Introdução

Diante das necessidades atuais da indústria de fabricação face ao cenário de mudanças dos novos tipos de produtos e do desenvolvimento de novos materiais, são grandes os desafios da engenharia para o desenvolvimento tecnológico de seus processos.

De acordo com **Cruz (1997)**, a necessidade humana obrigou a pesquisa a desenvolver novos materiais normalmente de difícil usinagem pelos processos tradicionais de fabricação. Surgiram novos aços-liga, as superligas, as cerâmicas finas, os compósitos, entre outros, que passaram a exigir novos processos de manufatura. Paralelamente, novas geometrias e formas crescentemente mais complexas e diminutas foram exigidas pelo mercado.

Sabe-se também que o desempenho de uma peça em trabalho é afetada não só pela natureza e estrutura do seu material, mas também pela integridade da superfície usinada. Desta forma, o grande desafio dos procedimentos de usinagem é conseguir elevadas taxas de remoção de material juntamente com excelentes níveis de qualidade da superfície usinada.

Afirmam **Oliveira e Purquério (1989)** que as pesquisas envolvendo o processo de retificação para acabamento superficial têm aumentado bastante nos últimos anos e deverão ser implementadas ainda mais nas próximas décadas.

Conforme **Rowe et al (1996)**, o desenvolvimento dos superabrasivos, como o Nitreto de Boro Cúbico (CBN), foi um acontecimento muito importante, pois estes propiciaram a usinagem de peças com menos danos térmicos que os abrasivos convencionais. Contudo, pesquisas recentes mostraram que apesar das características dos superabrasivos, ainda persistem alguns efeitos da ação mecânica do rebolo na peça durante esta retificação convencional superabrasiva, principalmente quando se usinam materiais muito resistentes mecanicamente como o aço rápido.

Segundo **Kozak et al (1998)**, o desenvolvimento dos processos de fabricação podem ser melhorados, ainda mais, com a combinação de processos de usinagem tradicional e não tradicional. Estes processos, ditos híbridos, proporcionam melhores resultados por serem capazes de potencializar as ações dos processos básicos.

A retificação eletroquímica, designada por ECG em alusão à sigla conhecida internacionalmente do termo "EletroChemical Grinding", é um processo híbrido de usinagem. Este método é fundamentalmente baseado na remoção de materiais condutores de

eletricidade, combinando o processo de usinagem eletroquímica com o processo de retificação convencional. A ECG tem uma promissora aplicação na usinagem de alguns materiais, independentes de suas características de dureza, fragilidade e resistência mecânica. Através deste processo híbrido de usinagem é possível conseguir elevada taxa de remoção de material garantindo, ao mesmo tempo, melhoria na qualidade superficial das peças usinadas.

Devido à natureza eletroquímica do processo, o material da peça é removido com geração mínima de calor e consequentemente sem produzir tensões internas de origem térmica e distorções.

Entretanto, a efetiva aplicação da usinagem por ECG é limitada pela ocorrência de certas limitações, entre eles, a falta de conhecimento pleno do processo, o grande número de variáveis do processo que influenciam os resultados finais do produto acabado, bem como o controle destas variáveis. Além disso, o processo ECG é complexo do ponto de vista funcional de seus mecanismos, não somente pela falta de entendimento perfeito de seus componentes (eletroquímico e abrasivo) mas, por existir incertezas com respeito a seus inter-relacionamentos.

Desta forma, há muito a evoluir para que o processo seja acessível para o maior número de usuários. Mesmo porque, poucos fabricantes mundiais dominam a tecnologia de projeto e fabricação de tais equipamentos e consequentemente muitas pesquisas de aplicação devem ser realizadas sobre o processo. E mesmo aqueles equipamentos mais conceituados e tecnologicamente finalizados, carecem de soluções mais eficazes e econômicas que só podem surgir com a pesquisa científica.

Em função do exposto, este trabalho, integrante do projeto global de pesquisa do Laboratório de Usinagem não Tradicional (UÑT), do Departamento de Engenharia Mecânica, procura contribuir com os conhecimentos tecnológicos sobre o processo, notadamente para a usinagem de materiais extra-duros.

Para isso, foram realizados ensaios experimentais de usinagem por retificação eletroquímica e convencional superabrasiva e os resultados comparativos dos dois processos foram então analisados para verificar a adequação do processo de retificação eletroquímica na obtenção de superfícies de acabamento e, com isso, igualmente analisar o desempenho da retificadora eletroquímica obtida no laboratório UÑT a partir de uma retificadora cilíndrica universal.

Os ensaios de usinagem foram realizados em amostras de aço rápido ABNT M6, utilizando um rebolo com abrasivo de CBN e ligante condutor de bronze na operação de retificação tangencial de mergulho com a mesa parada.

Espera-se, com este trabalho, além da realização dos ensaios comparativos entre os dois processos na retificação do aço extra-duro, como é o caso do Aço ABNT M6, cooperar

com o entendimento do processo ECG, de modo que o mesmo possa servir de referência para realização de outras pesquisas no âmbito da retificação eletroquímica.

O capítulo 2 deste trabalho apresenta algumas considerações genéricas sobre o processo ECG enfocando os princípios, os parâmetros mais importantes e alguns resultados característicos em termos da taxa de remoção de material e integridade da superfície usinada para aços com dureza acima de 40 HRc.

O capítulo 3 enfoca o procedimento experimental para os ensaios realizados: descreve a máquina utilizada, os parâmetros utilizados, o ferramental empregado e a metodologia experimental utilizada para os ensaios de usinagem.

A análise dos resultados e a discussão dos mesmos estão apresentados no capítulo 4 e as conclusões no capítulo 5. Ao leitor interessado em maiores detalhes sobre os resultados experimentais são apresentados três anexos que se acham expostos no final do trabalho.

Capítulo 2

Considerações Gerais Sobre o Processo de Usinagem por Retificação Eletroquímica

No decorrer dos últimos anos, assistiu-se a uma evolução assustadora dos processos de fabricação e produção de novos materiais, cada vez mais resistentes mecanicamente, necessitando serem usinados em condições de corte cada vez mais severas, mantendo controlados os erros dimensionais, de forma e posição e integridade superficial da peça.

De acordo com **Snoeys et al (1986)**, o estímulo ao estudo de novos métodos de usinagem se deve aos elevados níveis das forças utilizadas pela usinagem tradicional. Em alguns casos particulares, estes níveis podem simplesmente não serem suportados pela peça sob usinagem. Desta forma, uma atenção maior é dispensada a outros processos de usinagem que aqueles nos quais as propriedades mecânicas da peça (resistência mecânica, dureza etc..) sejam fatores limitantes. Em certas aplicações específicas da indústria, entre os ditos processos de usinagem não tradicionais, pode estar a única solução viável. Nos processos eletroquímicos, por exemplo, a usinabilidade de materiais está na realidade associada às suas propriedades eletroquímicas tais como: resistividade elétrica, valência e peso atômico.

Conforme **Cruz et al (1999)**, os principais motivos que inspiraram o desenvolvimento dos assim chamados processos não tradicionais de usinagem podem ser resumidos de acordo com a figura 2.1.



Figura 2.1 - Necessidades que motivaram a criação e evolução dos Processos Não Tradicionais de Usinagem [Cruz et al, 1999]

Nem todas as necessidades referidas na figura 2.1, no entanto, são cumpridas por um mesmo processo. As maiores contribuições dos processos eletroquímicos está na usinagem de materiais de alta dureza (embora necessariamente condutores) e na possibilidade de obtenção de superfícies de qualidade superior, por se tratar de processos que geram pouca energia calorífica.

Os autores **Snoeys et al (1986)** salientam ainda que os processos não tradicionais combinados com os processos convencionais, podem alcançar ainda melhores desempenhos que os processos originais. Esta combinação resulta nos chamados processos híbridos, entre os quais está o processo ECG, método este que combina a retificação utilizando rebolos condutores com a usinagem eletroquímica que se obtém ao se fazer passar uma corrente elétrica entre o rebolo condutor e a peça sob usinagem.

2.1 - Generalidades

A ação mecânica do processo ECG tem origem no processo de retificação convencional, amplamente utilizado pela indústria metal-mecânica para obtenção de peças com alto nível de qualidade geométrica, dimensional e superficial. A ação eletroquímica, na qual o material é removido de uma superfície metálica por dissolução anódica, tem origem no processo de usinagem eletroquímica, designada pela sigla ECM, em referência ao termo "Electrochemical Machining".

De certa forma, o modo pelo qual a dissolução anódica ocorre determina os resultados da usinagem. Esta dissolução anódica requer condições específicas, que são:

- uma distância entre a peça anódica e o rebolo catódico, muito pequena;
- altas densidades de corrente;
- grande fluxo de eletrólito na interface dos eletrodos.

Estas condições resultarão em alta taxa de remoção de material (TRM) e bom acabamento, este último associado às características metalúrgicas do material.

O eletrólito mais usado é a salmoura de NaCl (em concentrações de 10% a 50% em massa). Entretanto, outro sal bastante usado tem sido o NaNO_3 em concentrações que variam de 10 a 40% em massa, conforme indicado por **Pandey (1985)**. Outros eletrólitos também usados, porém com menor frequência, podem ser as soluções de NaClO_3 , H_2SO_4 , HCl etc.

De acordo com **Benedict (1987)**, pela natureza eletroquímica do processo de retificação eletrolítica, o material da peça é removido sem produzir rebarbas, com pouca geração de calor, com mínimas distorções ou tensões residuais. O eletrólito é introduzido na área de trabalho da

mesma maneira que o fluido refrigerante na retificadora convencional. Um esquema simplificado do processo de retificação eletroquímica encontra-se representado na figura 2.2.

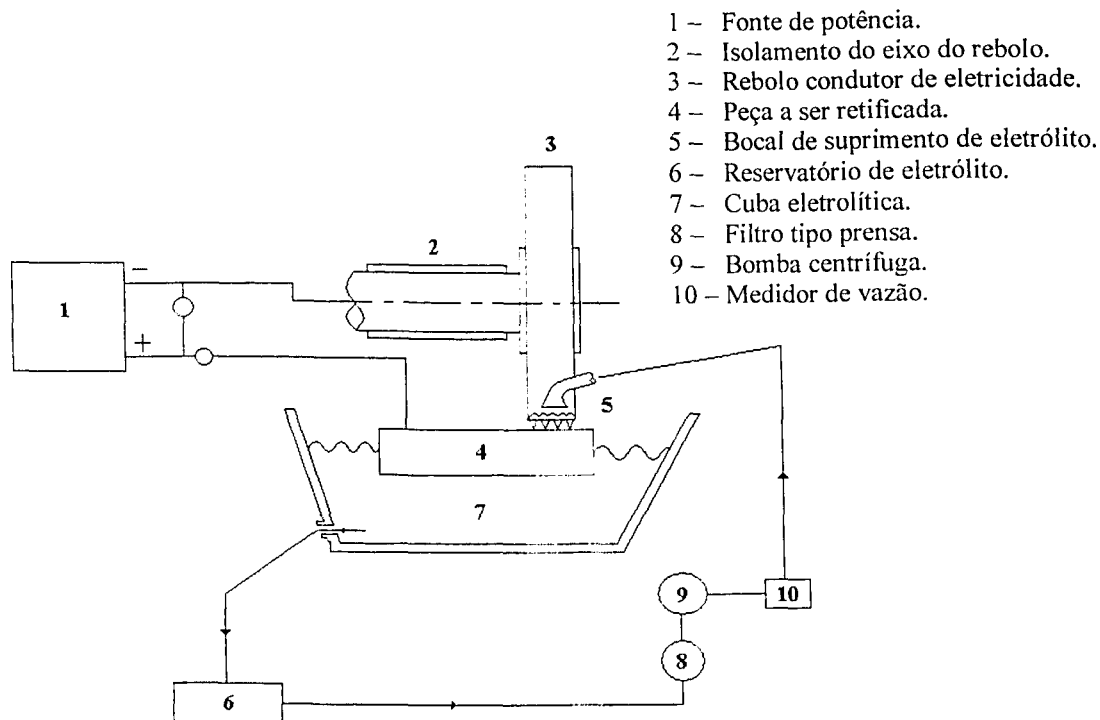


Figura 2.2 - Esquema simplificado do processo de retificação eletroquímica [Benedict,1987]

No esquema da figura 2.2, (3) representa o rebole ligado ao polo negativo da fonte (catodo) e (4) a peça ligada ao polo positivo da fonte (anodo). A fonte (1) de baixa voltagem e alta corrente (contínua ou pulsada) provoca, na interface ferramenta-peça, reações de dissociação anódica e catódica nas regiões da peça e da ferramenta respectivamente. O fluido eletrolítico é conduzido do reservatório (6) pela bomba (9), passando através do filtro (8) e rotâmetro (10) até ser introduzida na área de trabalho, provocando e preenchendo um pequeno gap (abertura entre o rebole e a peça de trabalho), dando início à ação eletrolítica.

Em casos onde um equipamento de retificação eletroquímica não for disponível, é possível transformá-la a partir de uma máquina retificadora convencional, com algumas modificações como a seguir:

- o conjunto ferramenta-peça deverá ser isolado eletroliticamente do cabeçote porta ferramenta;
- a ferramenta (rebole) e a peça deverão ser alimentadas eletricamente por uma fonte de potência adequada;
- tais componentes deverão ser isolados eletricamente do cabeçote porta-ferramenta;

- a máquina deverá ser equipada com um circuito eletrolítico para armazenar, alimentar e purificar o eletrólito.

De acordo com **Silva Neto (1999)** as máquinas de retificação eletroquímica são semelhantes às utilizadas na retificação convencional. Contudo, existem diferenças fundamentais entre os dois equipamentos, conforme a tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características da retificação convencional e eletroquímica [Silva Neto, 1999]

Retificação convencional e quando se usa rebolo de CBN	retificação eletroquímica
Remoção de material por abrasão.	Remoção de material por abrasão (aproximadamente-10%) ação eletroquímica (aproximadamente -90%).
Utiliza fluido de corte.	Utiliza o fluido eletrolítico (solução aquosa de NaCl, NaNO ₃ , entre outros).
Rebolo condutor ou não (não importa).	Rebolo condutor.
Não necessita de fonte de potência.	Necessita de uma fonte de corrente de baixa voltagem e alta amperagem.
Processo térmico (grande geração de calor).	Menor intensidade de calor.
O equipamento não sofre efeito de ações corrosivas importantes.	Sofre a ação corrosiva do eletrólito: o equipamento necessita ser fabricado com materiais resistentes à corrosão.

Segundo **Kozak et all (1998)**, no processo de retificação eletroquímica a produtividade é aumentada, as propriedades na camada superficial são melhoradas, enquanto que o desgaste da ferramenta é reduzido, além de ser uma usinagem efetiva em peças feitas de materiais de difícil corte, tais como carbonetos sinterizados, ligas resistentes à fluência (Inconel, Nimonic), ligas de titânio e compósitos de matriz metálica (PCD-Co, Al-SiC, Al-Al₂O₃).

De acordo com **Benedict (1987)** aproximadamente 90% do material é removido eletroquimicamente e apenas 10% mecanicamente. Isto explica o fato pela qual a vida do rebolo é cerca de 10 vezes maior que vida de um rebolo convencional. Outro fator que contribui para a longa vida do rebolo é o pequeno arco de contato mecânico, conforme se ilustra na figura 2.3.

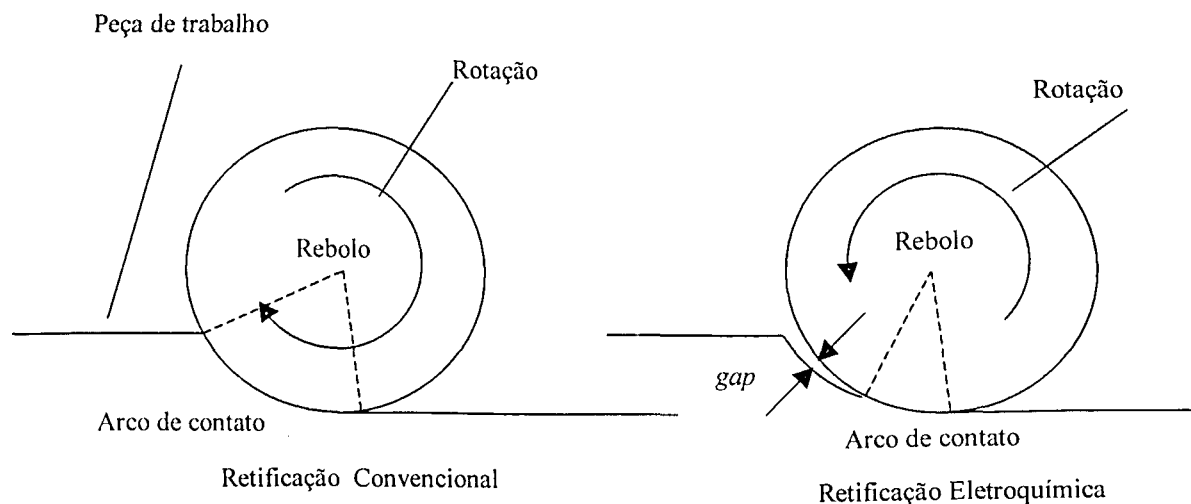


Figura 2.3 - Pequeno arco de contato físico parcialmente responsável pela longa vida do rebolo no processo ECG [Benedict,1987]

Segundo **Bruins (1972)**, os problemas de geração de tensões térmicas na retificação eletroquímica são praticamente eliminados, dada a geração de calor de menor intensidade se comparada com a retificação convencional superabrasiva. Este fato é decorrente de redução da ação mecânica do rebolo na peça e pela ação eletroquímica do eletrólito na interface peça–rebolo.

Como é notório, uma das desvantagens da retificação convencional superabrasiva é a geração de tensões térmicas da peça durante o processo de usinagem. Com isso, a precisão dimensional pode ser afetada, principalmente, na retificação de materiais muito duros, onde há necessidade de mais energia. No entanto, o efeito mais negativo da geração de tensões térmicas não é a variação dimensional e sim as distorções e geração de microtrincas.

De acordo com **McGeough (1988)**, a rugosidade superficial produzida pela retificação eletroquímica varia de $0,2\ \mu\text{m}$ a $0,3\ \mu\text{m}$, dependendo do material usado. Na retificação convencional, a rugosidade superficial produzida varia de $0,4\ \mu\text{m}$ a $3,2\ \mu\text{m}$.

Quanto à taxa de remoção de material, de acordo com **Benedict (1987)**, na retificação eletroquímica ela é cerca de 10 a 15 vezes maior que na retificação convencional superabrasiva, no caso da usinagem de materiais de dureza superior a 60 HRC.

Conforme **Pandey (1985)**, as vantagens do processo de retificação eletroquímica sobre a retificação convencional superabrasiva são:

- aumento da taxa de remoção de material;

- redução do calor na peça, propiciando menores riscos de danos térmicos na superfície de trabalho;
- ausência de rebarbas nos cantos;
- melhoria da superfície de acabamento com retificação sem riscos;
- redução da pressão do rebolo contra a peça;
- o processo é muito usado na retificação de ferramentas de carbonetos. Em comparação com a retificação convencional, a retificação eletroquímica propicia uma economia aproximada de 75% dos custos com rebolo e aproximadamente 50% dos custos de trabalho na retificação de carboneto de tungstênio;
- o processo é muito útil na retificação de materiais frágeis, endurecidos ou sensíveis ao calor. Além disso, altas taxas de produção podem ser conseguidas, na retificação de materiais frágeis;
- redução do custo de retificação. Apesar do custo do equipamento novo ser mais alto, o aumento da taxa de remoção de material e a redução do desgaste do rebolo compensam os custos de aquisição do equipamento.

2.2 - Fundamentos da Retificação Eletroquímica

Fundamentalmente, o processo ECG é uma forma especial de usinagem eletroquímica (ECM). Os princípios do processo são relativamente simples e diretos. Os componentes ativos básicos requeridos para os dois processos são praticamente os mesmos. Quais sejam, catodo (ferramenta ou rebolo), eletrólito (solução líquida), anodo (peça de trabalho) e uma fonte de potência de corrente contínua retificada ou pulsada onde a eletrólise toma lugar entre o anodo e o catodo, removendo material da peça de trabalho. A este processo eletrolítico alia-se a ação mecânica do rebolo com a finalidade de agilizá-la, removendo da superfície de trabalho a camada encrostada. Nota-se que esta camada, se não eliminada, tende a emperrar o processo pois em alguns casos é isolante e, em outros, passivadora.

Dissoluções anódicas e reações catódicas

Assim como no processo ECM, a retificação eletroquímica é um processo que tem como base a dissociação eletrolítica para arrancar material de um dos dois condutores mergulhados em uma solução líquida e ligados aos pólos de uma fonte de energia de alta potência. O pólo positivo é ligado à peça (anodo), e o polo negativo é ligado a ferramenta

(catodo). Assim, para uma solução aquosa de cloreto de sódio ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) por exemplo, os íons produzidos são Na^+ e Cl^- , respectivamente positivos e negativos:



A água também se dissocia em íons de hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-):



Os cátions (íons positivos) H^+ e Na^+ são atraídos para o polo negativo (ferramenta) e os ânions (íons negativos) Cl^- e OH^- para o polo positivo (peça). A aplicação de uma diferença de potencial através de uma fonte de potência apropriada provoca uma corrente elétrica no circuito pela qual os elétrons dos orbitais externos dos átomos constitutivos da peça são arrastados para o polo negativo. Esses elétrons que se desprendem de um metal M genérico de valência n da peça provocam a reação 2.3.



Tais elétrons preenchem os orbitais dos cations H^+ gerando gás H_2 , conforme a equação 2.4:



Este íon positivo (M^{n+}) irá reagir com o ânion mais eletronegativo presente (que neste caso é o OH^-), gerando a reação 2.5, responsável pela remoção do material da peça (dissolução anódica) que se transforma em hidróxidos metálicos.



Para exemplificar, considere-se a figura 2.4 que representa uma célula eletrolítica em cujo anodo se tem uma peça de aço que se constitui basicamente de ferro. Como o ferro pode ser bi ou trivalente (dependendo do nível de excitação elétrica), podem ocorrer uma ou outra, ou até as duas (que seria o mais comum), das reações abaixo (2.6 e 2.7 ou 2.8).



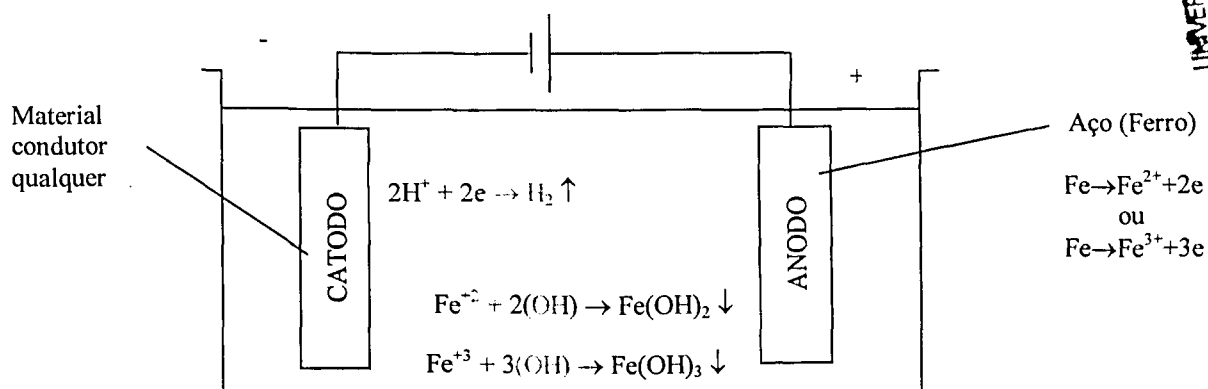
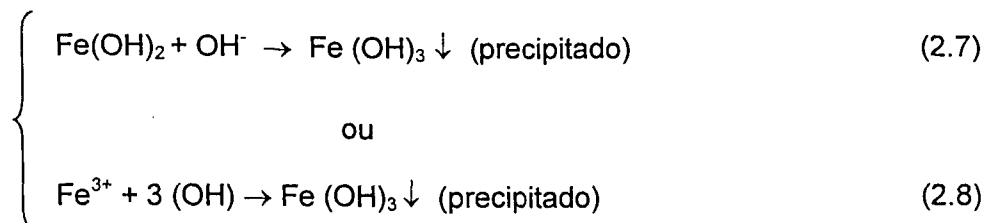


Figura 2.4 - Esquema de uma célula eletrolítica com anodo de Ferro

As equações acima, explicam a formação de gás hidrogênio (H_2) na região próxima do rebolo e a desintegração da peça de aço, através da dissociação anódica do ferro que se transformam em precipitados de hidróxidos de ferro, Fe(OH)_2 e Fe(OH)_3 .

Os elementos da reação e os produtos finais estão relacionados na equação abaixo:



É importante observar que os íons Na^+ e Cl^- , obtidos do cloreto de sódio, bem como os íons de outros sais que venham ser utilizados, não participam das principais reações do processo como elementos reagentes e consequentemente do produto final. Este fato ocorre devido à maior facilidade do íon H^+ receber elétrons que o Na^+ (mais eletropositivo). O mesmo ocorre com o Cl^- que praticamente não participa das reações anódicas por ser menos eletronegativo que o OH^- . No entanto, estes íons (Na^+ e Cl^-) tem forte participação no sentido de ativar o processo de eletrólise da água.

Desta forma, conclui-se que o eletrólito permanece imutável, somente sua concentração aumenta pelo desaparecimento progressivo da água que sofre eletrólise.

Os precipitados produzidos pelas reações eletroquímicas permanecem no eletrólito, que devem ser submetidos a um processo de limpeza para não interferir nos resultados da usinagem. No caso do gás hidrogênio, este deve ser exaurido do ambiente de usinagem para não causar danos já que é combustível e pode explodir.

A Figura 2.5 mostra a curva de polarização qualitativa do comportamento do ferro e suas ligas durante a usinagem eletroquímica utilizando-se eletrólitos a base de NaCl e NaNO₃, adaptada de **Rumyantsev e Davidov (1989)**. Tal curva fornece a corrente I gerada em função da diferença de potencial (E) aplicada entre os eletrodos.

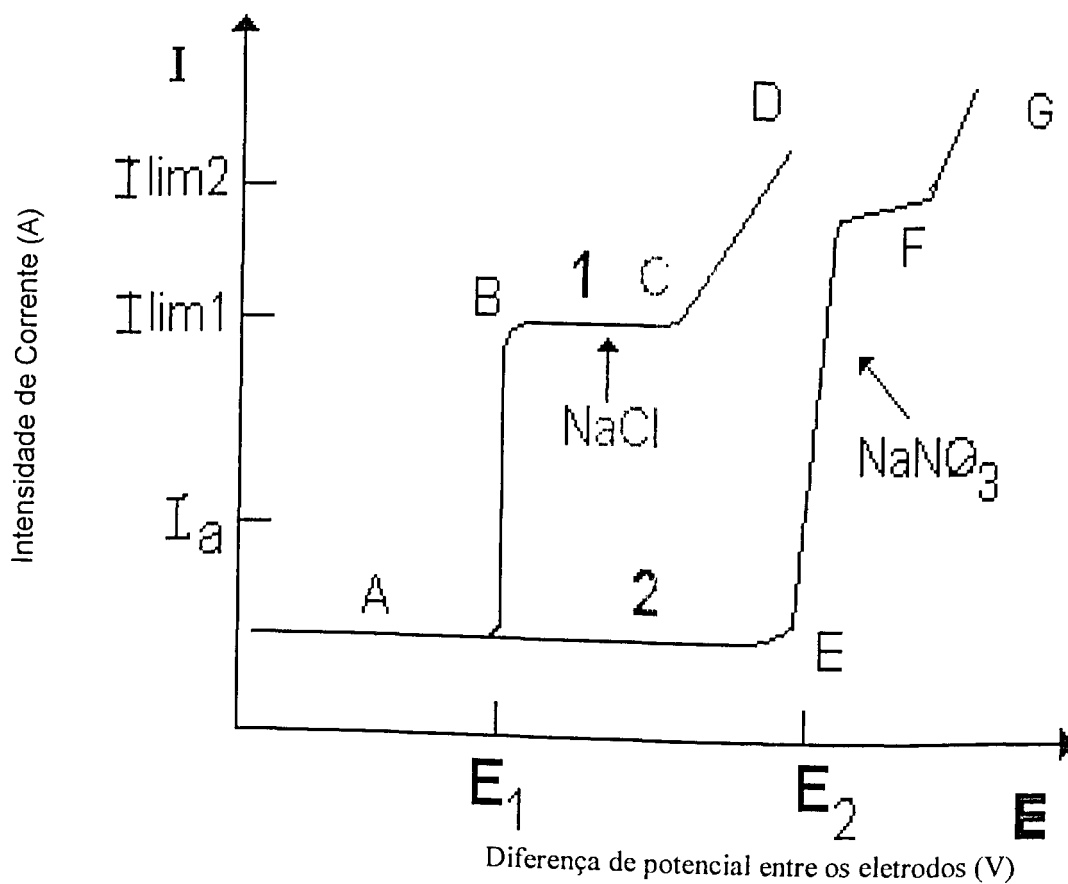


Figura 2.5 – Curvas de polarização anódica simplificadas do ferro e suas ligas para o NaCl (curva 1) e NaNO₃ (curva 2) do processo ECM [Rumyantsev e Davydov, 1989]

Segundo **Rumyantsev e Davydov (1989)**, as seguintes considerações podem ser feitas sobre as curvas de polarização 1 (para a solução de NaCl) e 2 (para a solução de NaNO₃).

Curvas de polarização 1 – ABCD (Solução de NaCl):

Na tensão E_1 ocorre ruptura da passividade do metal. Ao atingir a região de ativação anódica **AB**, a intensidade de corrente sobe abruptamente até alcançar uma situação de regime. Neste ponto a taxa de dissolução do metal cessa de crescer, assim que um valor limite de intensidade de corrente I_{lim1} é alcançado. A intensidade de corrente é contida pela própria dissolução anódica que se estabelece. Assim, os produtos da dissolução, que no caso mais comum é o $FeCl_2$, forma um depósito de cor escura na superfície do eletrodo. Os cristais deste sal precipitam pela ação de supersaturação que ocorre na solução.

Na usinagem por ECG o valor de I_{lim1} pode ser aumentada empregando-se mecanismo de agitação ao eletrólito, uma vez que seu valor está relacionado com a difusão do eletrólito. Valores altos de corrente associados ao aumento da taxa de remoção de material, dentro da região **CD**, são atribuídos tanto pela agitação vigorosa do eletrólito provocada pela dissolução gasosa, como também pelo aumento de temperatura na superfície do eletrodo, que atingindo um valor crítico induz a uma ativação térmica anódica.

Dentro da região **AB** o metal também é atacado, porém, com diferenças no acabamento superficial obtido. Já na região anódica **BC**, a superfície produzida tende a ser polida.

Curvas de polarização 2 – AEFG (solução de $NaNO_3$):

A curva 2 da figura 2.5 representa o comportamento da dissolução anódica do ferro, e suas ligas em solução de $NaNO_3$. A principal diferença com relação a solução de NaCl está no fato de que não ocorre praticamente nenhuma dissolução dentro da larga faixa de diferença de potencial que se estende até valor E_2 .

A ativação aniônica deste eletrólito ($NaNO_3$) é relativamente impedida, quando comparada a do eletrólito NaCl, por necessitar de um notável potencial anódico substancialmente maior E_2 . Uma vez atingido o potencial E_2 tem início a uma alta taxa de dissociação do metal.

A dissolução anódica do ferro ativada a alta densidade de corrente em solução eletrolítica de $NaNO_3$ pode produzir uma alta taxa de concentração de produtos dissociados e um depósito de sal na superfície anódica da mesma forma que ocorre com o eletrólito de NaCl. Entretanto, o valor limite de corrente I_{lim2} na curva 2 define uma faixa estreita de potencial, onde de fato ocorre remoção. Conclui-se que pequenas variações no *gap*, quando se trata do uso do $NaNO_3$ como eletrólito, provoca razoáveis quedas de potencial.

Ação mecânica

A influência da ação mecânica dos grãos abrasivos no material da peça de trabalho muda as condições do processo de dissolução anódica. Para **Kozak et al (1998)**, o principal fator da ação é a remoção da camada passivadora, ou seja uma camada fina não reativa de óxido e outros bloqueadores da ação elétrica e química da peça (ânodo). Esta ação garante que o processo de dissolução anódica e polimento da peça sejam mais intensos. De acordo com **Ilhan et al (1991)**, as partículas abrasivas servem:

- como isolamento para manter células eletrolíticas entre o ligante condutor do rebolo e a peça de trabalho,
- para limpar constantemente a camada de óxido,
- para remover o material resultante da reação química durante a ação mecânica.

Se a camada de óxido é removida a uma taxa constante, o processo é contínuo.

Segundo **Brandi (1974)**, se este material encrostado não for removido da superfície da peça, ele poderá impedir nova ação eletrolítica. No processo ECG, a ação mecânica abrasiva do rebolo limpa a superfície do metal e remove o óxido que é produzido como reações secundárias e indesejáveis do processo de eletrólise.

Portanto, para ocorrer ação eletroquímica, não é necessário que o rebolo contenha grãos abrasivos, contanto que o rebolo seja condutor e mantenha uma certa distância da peça de trabalho.

Este óxido macio na superfície do metal é removido imediatamente pelos abrasivos do rebolo. Assim que o filme de óxido é limpo, a superfície do metal fica imediatamente exposta para ser novamente oxidado quimicamente dando continuidade ao processo. Fazendo isso, no contato, os abrasivos devem tocar a peça removendo material por abrasão.

Phillips (1985) afirma que na maioria dos casos essa remoção esta na faixa de 5 a 10% do material removido.

Interface ferramenta-peça

A remoção de material ocorre em três fases correspondentes a três zonas do rebolo, **Bennedict (1987)**. A fase 1, indicado pela figura 2.6, é inteiramente eletroquímica, onde os produtos formados na superfície da peça são arrastados pela ação do eletrólito.

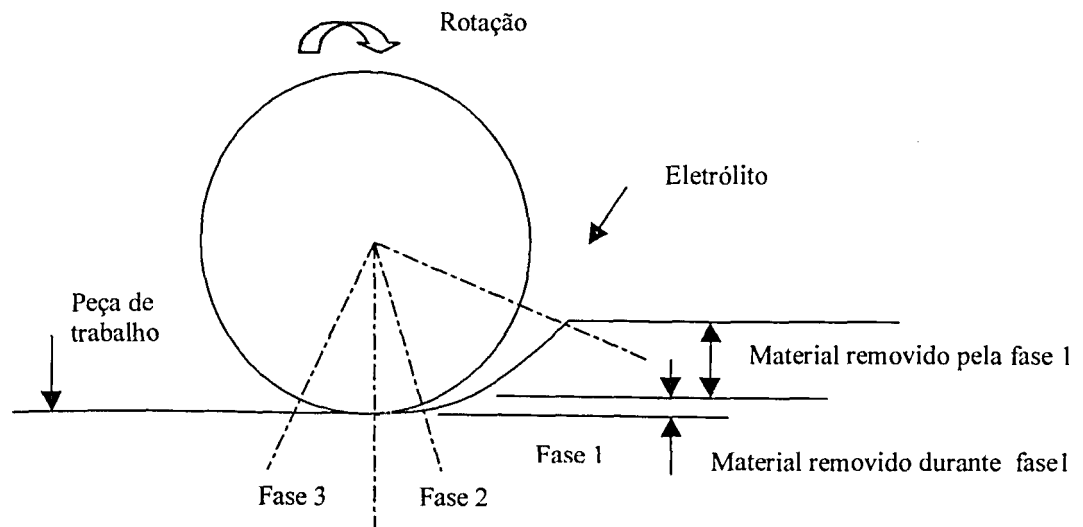


Figura 2.6 - As três fases da remoção de material por ECG [Bennedict,1987]

A remoção de material na fase 2 é mecânica e começa no ponto onde os abrasivos estão em contato direto com a peça de trabalho. O eletrólito aprisionado entre os grãos abrasivos salientes formam minúsculas pilhas eletrolítica. O eletrólito é forçado para dentro do arco de contato pelo movimento rotacional do rebole, aumentando sua pressão na interface entre a peça e o rebole aumentando a remoção de material e evitando também, a formação de bolhas de gás.

Os grãos abrasivos que estão em contato com a superfície da peça durante a fase 2 removem desta superfície a camada macia não reativa de produtos químicos. Desta forma, novo metal é exposto para nova ação do eletrólito. A fase 2 termina no ponto onde o rebole se levanta da superfície da peça.

A remoção de material na fase 3 é novamente eletroquímica. Como o eletrólito já está contaminado na região de saída do eletrólito, ele continua a desgastar lentamente a peça. Esta fase remove muito pouco material, mas tende a remover eletroquimicamente qualquer risco ou rebarba que eventualmente possam ter se formado.

Um diagrama esquemático do processo ECG no caso pelo método de retificação superficial plana é mostrado na figura 2.7, conforme Kozak e Oczós (1998).

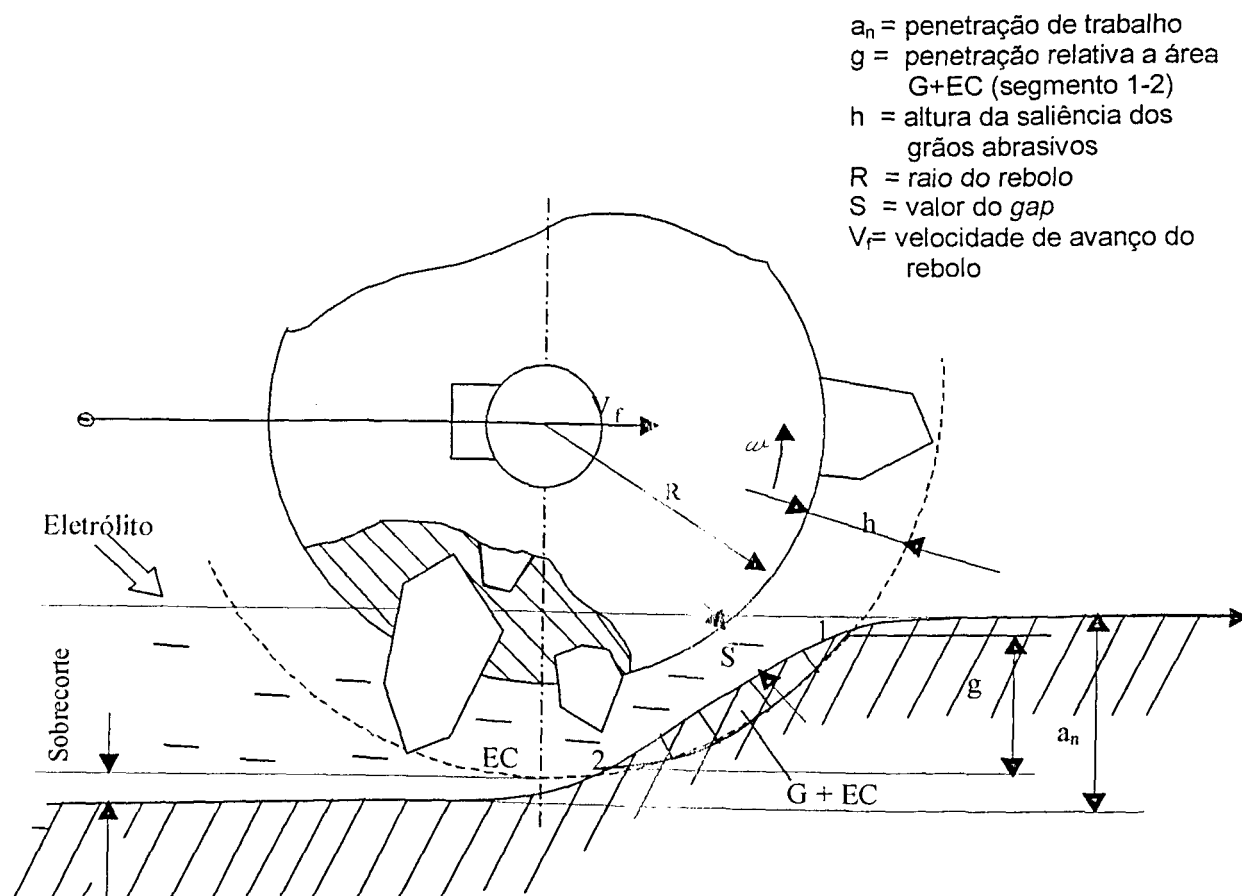


Figura 2.7 – Diagrama esquemático da retificação eletroquímica (ECG) [Kozak e Oczós, 1998]

Estes autores afirmam que existem interligações entre micro-usinagem, dissolução eletrolítica, mudanças nas propriedades da camada superficial do material na área usinada.

As seguintes regiões podem ser distinguidas na interface rebolo-peça: zona EC, onde prevalece a dissolução anódica, e zona G+EC, onde predomina a usinagem abrasiva. Com a participação de um ou outro destes dois mecanismos no processo de remoção de material, ocorrem mudanças nos parâmetros do processo ECG. Por exemplo, variando-se a velocidade de avanço do rebolo (V_f) enquanto mantém-se outros parâmetros do processo constante, em que V_f permanece abaixo de certos valores críticos representado por V_g , a usinagem abrasiva desaparece. Ao atingir valores acima da velocidade crítica V_g a usinagem abrasiva é iniciada. Por causa desta condição o gap (abertura entre o rebolo e a peça - S) entre a superfície do

aglomerante do rebolo e a superfície da peça, é maior que a altura h da saliência do fragmento dos grãos abrasivos.

A Ação dos grãos abrasivos é limitada em sua influência na condição de existência do gap, e em particular do campo elétrico, condições de transporte do eletrólito, e efeito hidrodinâmico na camada limite próximo ao ânodo.

O aumento na velocidade de avanço do rebolo V_f , resulta na redução de S , e após o valor de V_f exceder V_g , aumenta o segmento 1-2 (fig.2.7), o valor de S torna-se menor que o de h , e em conseqüência aumenta a contribuição da usinagem abrasiva para o processo de remoção do material.

2.3 - Fatores que Influem no Desempenho da Retificação Eletroquímica

Condições ótimas de retificação no processo convencional podem ser alcançadas quando a máxima taxa de remoção de material é atingida mantendo a desejada integridade superficial do componente final. Segundo **Bhattacharyya et al (1984)**, para obter estes objetivos o processo tem que satisfazer certas especificações de integridade superficial juntamente com certos objetivos de alta produtividade, conforme ilustra a figura 2.8.

Componentes retificados muitas vezes operam sob severas condições de trabalho e esforços mecânicos, consequentemente necessitam de uma alta integridade superficial. Para conseguir isto, o processo de retificação não poderá produzir defeitos superficiais indesejáveis como micro-trincas, camada superficial endurecida, ou tensão residual de tração.

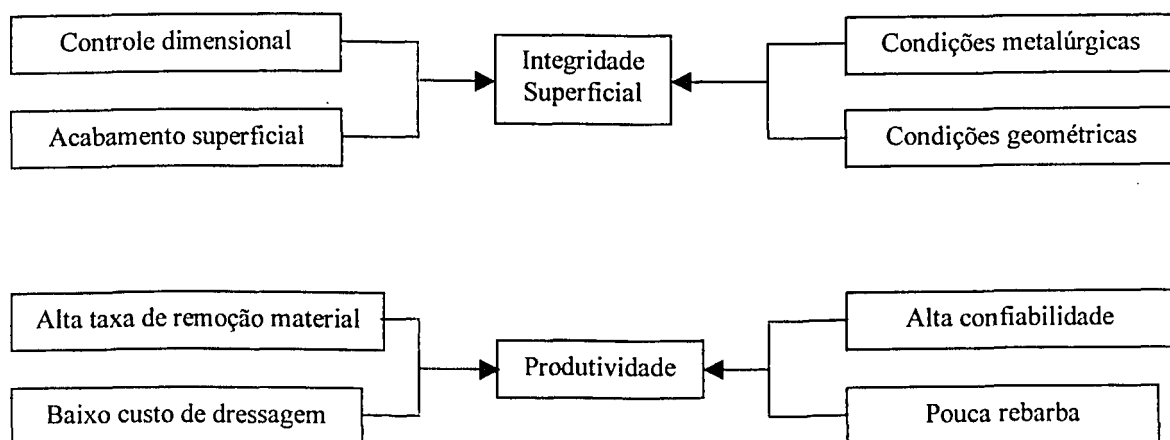


Figura 2.8 - Especificações a serem satisfeitas para alcançar condições ótimas de retificação [Bhattacharyya et al, 1984]

Hahn e Lindsay (1984), observaram tensões de compressão residuais favoráveis resultantes da operação de retificação de acabamento com rebolo de CBN. Eles observaram que quando retificado com rebolo afiado e baixa taxa de alimentação, para se conseguir um bom acabamento superficial, a tensão residual foi preponderantemente de compressão, ao invés de tração.

Segundo estes autores, existem três tipos de operações de retificação: suave, convencional e rigorosa. A condição de retificação suave (baixa velocidade de avanço) produz um bom acabamento superficial e também não evidencia alterações na camada superficial nem tensão residual de compressão. Na retificação severa (alta velocidade de avanço) produz-se um acabamento superficial pobre, rebarbas na superfície de trabalho e tensão residual que pode induzir trincas superficiais e sub-superficiais na peça de trabalho.

É possível selecionar parâmetros para assegurar uma boa integridade superficial, bom acabamento superficial, sem rebarba superficial, tensão de compressão residual favorável, mas estas condições (retificação suave) ditam uma baixa taxa de produtividade. Estes autores descreveram que o acabamento superficial da peça de trabalho é afetado primeiramente pela intensidade de força normal entre o rebolo e a peça de trabalho e a condição de dressagem do rebolo. Portanto, o acabamento superficial da peça retificada é melhorada com a redução da intensidade da força normal.

O acabamento superficial é também afetado pela vibração e trepidação regenerativa. Esta vibração produz um acabamento superficial com baixa qualidade na peça de trabalho e, conseqüentemente, o rebolo deve ser redressado quando a magnitude de vibração inicial for grande.

De acordo com **Risko (1990)**, as características superficiais de uma peça usinada por retificação convencional são afetadas pelas suas condições de usinagem, quais sejam, alta taxa de alimentação da mesa, grandes profundidades de corte, altas temperaturas de retificação, força normal e tangencial de retificação etc.

Na usinagem por ECG pode-se dizer que a TRM e integridade superficial dependem também de vários fatores. Os mais importantes acham-se indicados, juntamente com os fatores intervenientes da retificação convencional, na Figura 2.9, cujo diagrama é uma síntese do trabalho de vários autores, entre os quais **Kozak et al (1998)**, **Bennedoct (1987)** e **Phillips (1985)**.

Conforme ilustra este diagrama, os fatores que interferem nos resultados da usinagem ECG estão agrupados basicamente em três fontes relativas à ação mecânica da usinagem juntamente com três fontes relativas à dissolução anódica.

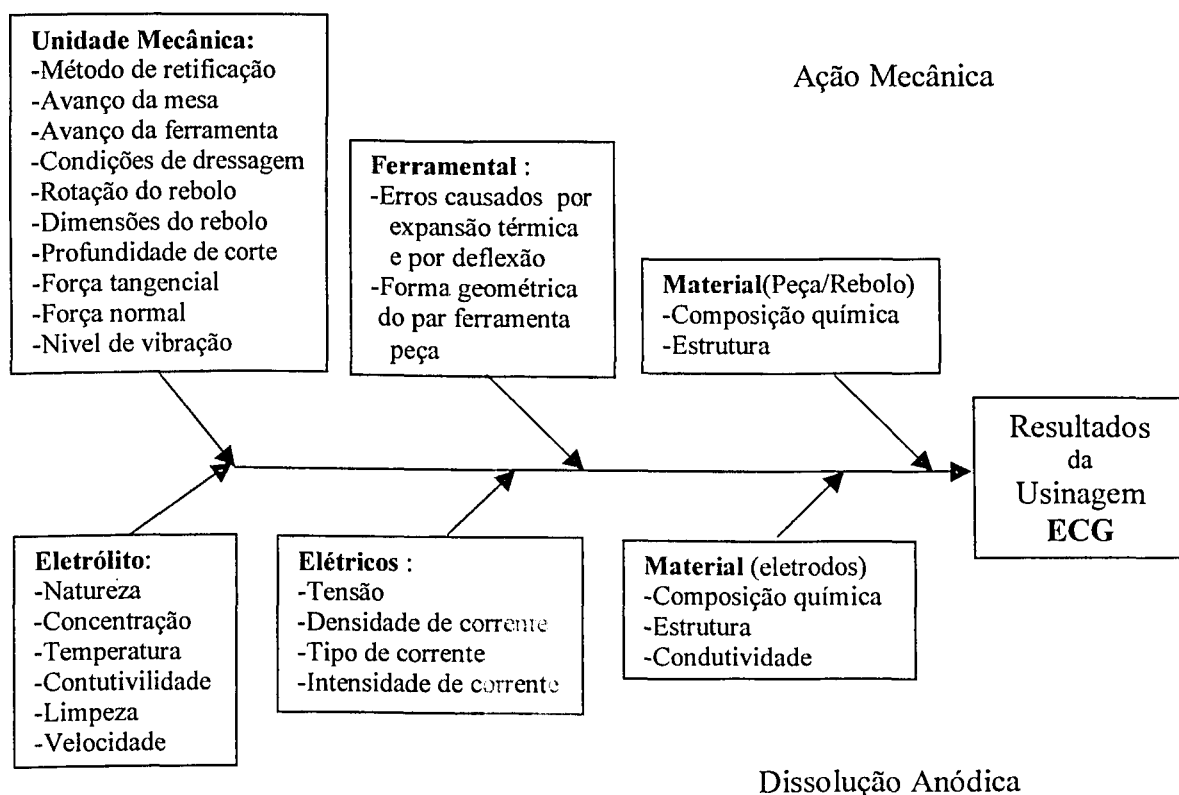


Figura 2.9 - Fatores que influenciam os resultados da usinagem por ECG

Considerando-se que a usinagem por retificação eletroquímica ECG é um processo híbrido de usinagem que associa a retificação convencional ou superabrasiva e ECM, os resultados de usinagem por esse processo também sofrerão influência, com maior ou menor intensidade, do conjunto de fatores intervenientes dos dois processos básicos (dissolução anódica e ação mecânica). Como no processo ECG o ideal é que somente de 5 a 10% do material removido seja por abrasão, as propriedades mecânicas terão pouco efeito significativo neste processo.

Dentre todos os parâmetros relacionados na figura 2.9, vários são passíveis de controle, direto ou indireto, dependendo dos recursos disponíveis no equipamento. Outros parâmetros são controlados pela própria sinergia do processo.

Segundo **Phillips (1985)** entre os parâmetros passíveis de um monitoramento direto, estão:

- tensão da fonte;
- velocidade de alimentação da mesa;
- tipo e concentração do eletrólito;
- vazão, pressão e velocidade do eletrólito.

Entre os parâmetros controlados pela sinergia do processo, pode-se relacionar:

- tensão no *gap*;
- valor do *gap*;
- intensidade de corrente;
- temperatura na interface;

Na figura 2.10 tem-se uma representação esquemática das influências dos parâmetros passíveis e não passíveis de controle que compõe o processo de usinagem por ECG.

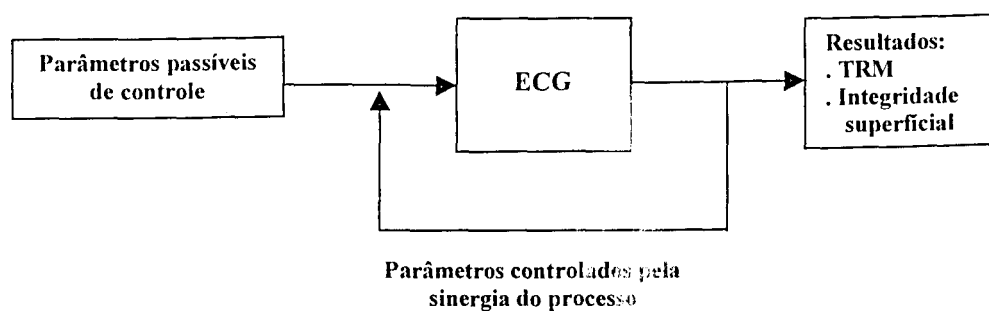


Figura 2.10 – Inter-relação sistêmica dos parâmetros físico-químicos do processo ECG

Neste esquema tem-se os parâmetros relacionados ao processo ECG reunidos em três grupos, desta vez segundo as possibilidades de medição e controle. Estes parâmetros representam, ao todo, um conjunto de elementos físico-químicos interativos (ação mecânica e dissolução anódica). Um grupo é formado pelas variáveis de entrada ou variáveis independentes, ou ainda, disponíveis para ajuste, as quais são passíveis de controle. Outro grupo é formado pelos resultados obtidos pelo processo e podem ser medidos e comparados com os valores desejados, formando-se assim um sistema possível de controle ou auto-regulação do sistema formado. Pode-se entender o terceiro grupo como sendo a realimentação deste sistema através dos parâmetros controlados pela sinergia do processo ou variáveis dependentes. Forma-se assim um sistema possível de controle ou auto-regulação a partir da otimização dos parâmetros de entrada.

Velocidade de avanço do rebolo

Segundo Kozak e Oczós (1998), no processo ECG, a redução da profundidade da camada de corte "*g*" em relação à real profundidade de corte (*a_n*), da figura 2.7, é de grande importância para o processo de micro-usinagem. A proporção da redução da profundidade "*g*",

0083150

expressado pela razão g/a_n , é determinada pela altura da zona G+EC, que depende da influência dos parâmetros eletroquímicos do processo, como tensão da fonte, condutividade elétrica do eletrólito, bem como os parâmetros cinemáticos e propriedades do rebolo de retificação, tais como taxa de alimentação e concentração dos grãos do rebolo.

A Figura 2.11, mostra exemplos de mudanças na taxa g/a_n em função da velocidade de avanço V_f , para várias tensões da fonte U , obtidos através de simulação do processo ECG por computador (Kozak e Oczós, 1998). Utilizando como valores fixos: $R = 50$ mm, $k_v = 0,016$ A/V.mm e os seguintes valores dos fatores examinados $U = 6$; 9 e 12 V; $V_f = 60$; 120 e 240 mm/min, e $h = 70$ μ m.

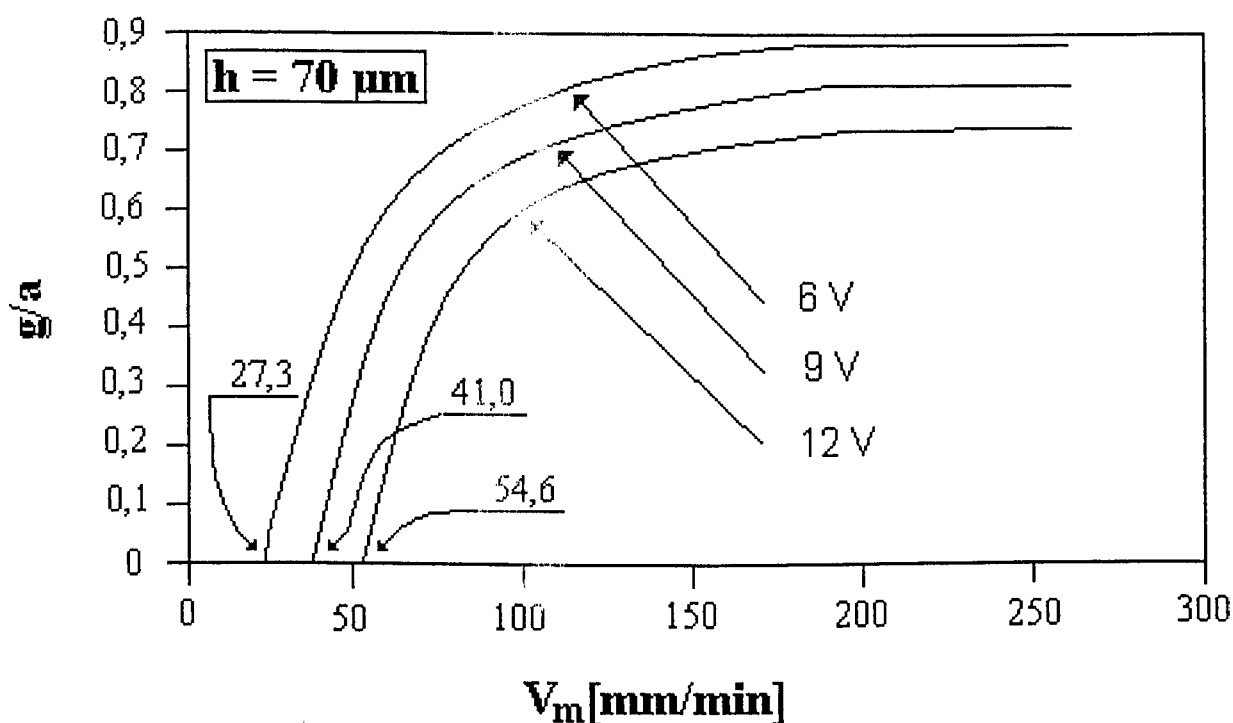


Figura 2.11 - Razão g/a_n versus velocidade de avanço do rebolo V_f para diferentes tensões da fonte [Kozak e Oczós, 1998]

Para valores de V_f abaixo de aproximadamente 90m/min, a redução da velocidade de avanço V_f é seguida por considerável redução na taxa g/a_n , até valores próximos de zero, onde ocorre a dissolução eletroquímica "pura". Esta redução de V_f implica numa significativa redução das forças de corte. Valores limites da velocidade de avanço, para os quais a usinagem abrasiva desaparece, dependem de parâmetros elétricos, da usinabilidade eletroquímica do material em um dado eletrólito, e características do rebolo de retificação além da altura h .

Qualquer modificação no valor do *gap* (S) irá influenciar no valor da intensidade de corrente que passa pela interface ferramenta-peça modificando, desta forma, o comportamento da dissolução anódica do metal. Segundo **McGeough (1988)**, para a usinagem eletroquímica (ECM), o ideal para o bom funcionamento do processo é a manutenção do valor do *gap* (S) constante. Isto é conseguido com a estabilização do processo, onde a velocidade de remoção de material (V_e) se torna igual à velocidade de avanço da ferramenta (V_f). Quanto ao sistema de avanço da ferramenta na usinagem eletroquímica (ECM), existem na prática, três casos distintos:

- com a ferramenta estacionária ($V_e = 0$)
- com avanço constante da ferramenta ($V_e = \text{constante}$);
- com a condição de curto-circuito

As duas primeiras condições estão ilustradas na figura 2.12.

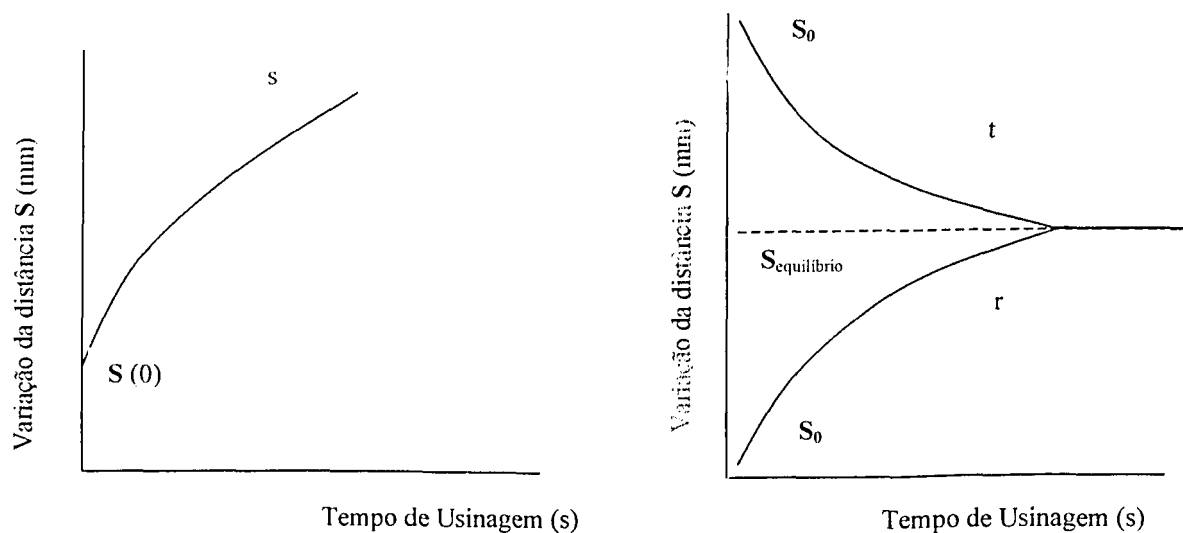


Figura 2.12 – Variação da distância entre o rebolo e a peça de trabalho (S) com o tempo de usinagem ECM: curva s - ferramenta estática, curvas t e r - velocidade de avanço constante [McGeough,1988]

Na primeira condição (Figura 2.12 - curva s), um valor inicial de S é prefixado e igual a S_0 . A usinagem é realizada até que a intensidade de corrente aparente de trabalho atinja um valor mínimo para o qual praticamente não há dissolução anódica. Na realidade, a queda na intensidade de corrente se deve ao aumento de S e do conseqüente aumento da sua resistência elétrica que impede a ocorrência de dissolução anódica.

A usinagem com avanço constante (figura 12 – curvas r e t) requer condições adequadas da vazão e da pressão, de maneira a minimizar os efeitos decorrentes da evolução de gases e aumento da temperatura na interface ferramenta-peça, evitando curtos circuitos e descargas elétricas. Estabelecendo estas condições necessárias, o valor de S_0 é preestabelecido, reduzindo (se $S_0 > S_{\text{equilíbrio}}$) ou aumentando (se $S_0 < S_{\text{equilíbrio}}$) até um valor de equilíbrio. Desta forma o equilíbrio adequado do *gap* é obtido quando a velocidade do avanço da mesa for igual à velocidade de remoção do material ($V_e = V_f$).

A condição de curto-circuito poderá ocorrer se as condições do processo resultarem em velocidade de avanço muito alta. Com isso, o valor de S se torna muito pequeno o que pode resultar em contato entre os eletrodos, ocasionando curto-circuito entre eles. Isto é altamente indesejável pois pode encerrar prematuramente o processo de usinagem com danos tanto à peça como à ferramenta.

Corrente e densidade de corrente

Dentre outros fatores que afetam a remoção de material na usinagem por ECG, a intensidade de corrente é o de maior influência, como será visto no item 2.4. A intensidade de corrente é função da tensão e da resistência total do circuito elétrico interligando a fonte, a ferramenta e a peça. Entretanto, como todas as resistências do circuito tornam-se desprezíveis face ao valor da resistência do *gap*, tal valor, bem como a resistividade do eletrólito passa a ter muita importância como variável do processo. Assim, pela lei de Ohm tem-se:

$$I = U / R_c \quad (2.10)$$

Onde:

$I \Rightarrow$ intensidade de corrente

$U \Rightarrow$ diferença de potencial da fonte

$R_c \Rightarrow$ resistência do circuito

Como R_c é aproximadamente igual à resistência do *gap*, e este é dado por

$$R_g = r S / S_a \quad (2.11)$$

Onde:

$R_g \Rightarrow$ Resistência do *gap*

$r \Rightarrow$ Resistividade do eletrólito

$S_a \Rightarrow$ área da seção transversal da ferramenta ou da peça por onde passa o fluxo elétrico

Das expressões 2.10 e 2.11, resulta a expressão 2.12:

$$I = \frac{U_a \cdot S_a}{S \cdot r} \quad (2.12)$$

Para que a intensidade de corrente (I) seja máxima, deve-se maximizar a tensão (U) e a área (S_a), e minimizar o valor do *gap* (S) e a resistividade do eletrólito (r). Portanto, a maximização da corrente dependerá da minimização do *gap* (S) e da resistividade do eletrólito (r). No entanto, deve-se considerar que a tensão está restrita à disponibilidade da fonte de potência e a necessidade de baixa voltagem para que não ocorra abertura de arco voltaico e descargas elétricas entre a ferramenta e a peça. Deve-se considerar também que a área (S_a) é função da peça que se deseja usar.

Segundo **Kozak et al (1998)**, o uso de uma corrente pulsada associado a uma boa escolha do eletrólito, resulta em melhor acuracidade de forma.

Sendo a área efetiva de trabalho (S_a) dependente da geometria da peça a ser usinada, um parâmetro muito utilizado em usinagem eletroquímica é a densidade de corrente, definida pela expressão 2.13.

$$J = \frac{I}{S_a} \quad (2.13)$$

Onde:

$J \Rightarrow$ densidade de corrente elétrica (A/cm^2);

Combinando-se (2.12) com (2.13) tem-se:

$$J = \frac{U}{S \cdot r} \quad (2.14)$$

Segundo **Phillips (1989)**, no processo de retificação eletroquímica a corrente é bastante alta devido aos pequenos valores de S (0,015 a 0,08 mm). O resultado é que a intensidade de corrente J pode alcançar até $500 A/cm^2$ em uma operação de retificação superficial plana.

Portanto ECG é um processo de baixa diferença de potencial e alta intensidade de corrente elétrica.

Segundo **Brandi (1974)**, a condutividade elétrica do metal da peça tem pouco efeito na densidade de corrente do *gap*. Assumindo-se que se tenha uma corrente adequada disponível, existem dois fatores fundamentais que influem diretamente no estabelecimento da densidade de corrente na área de ação do eletrólito:

- a taxa de ionização do eletrólito e,
- uma relativa afinidade do ânion do eletrólito para o metal da peça.

Tensão da fonte

A escolha de uma tensão apropriada de trabalho (U) é de grande importância para o processo, pois vai influir diretamente nos resultados de usinagem de acordo com o tipo de material usinado e eletrólito empregado. Assim, conforme as curvas de polarização do ferro e suas ligas (figura 2.5), pode-se obter taxas de dissolução onde o *gap* seja suficiente para estabelecer uma tensão acima de E_2 , e consequentemente uma intensidade de corrente de I_{lim} .

Segundo **Phillips (1985)**, os valores usualmente utilizados são de até 15 V.

Eletrólito

O eletrólito tem três funções básicas no processo ECM: agir como condutor para facilitar a passagem de corrente elétrica entre a peça e a ferramenta, facilitando as reações desejadas do processo de dissolução anódica, arrastar os produtos formados destas reações químicas e resfriar a região de usinagem (**Malaquias, 1996**).

Desta forma, o eletrólito faz a ligação entre os eletrodos ferramenta e peça, permitindo que ocorra a passagem de corrente elétrica e também a função de retirar o calor e os produtos da reação para fora da zona de trabalho. Assim, segundo **Benedict (1987)**, para que uma solução eletrolítica seja considerada eficiente e adequada ao uso, deve satisfazer determinadas exigências:

- alta estabilidade química;
- boa condutividade elétrica;
- pouca ação corrosiva;
- neutralidade fisiológica em relação aos operadores;

- baixo custo.

De acordo com **McGeough (1988)**, a escolha do tipo do eletrólito a ser utilizado na usinagem eletroquímica (ECM) tem um papel importante. O Cloreto de Sódio (NaCl), por exemplo, produz peças menos acuradas do que o Nitrato de Sódio (NaNO_3). Este último possui um melhor controle dimensional devido à sua curva característica de eficiência de corrente em função da densidade de corrente, ilustrada na Figura 2.13.

Fazendo-se uma comparação entre as duas curvas apresentadas na Figura 2.13, pode-se dizer que a eficiência de corrente para o Nitrato de Sódio aumenta à medida que aumenta a densidade de corrente. Já com o Cloreto de Sódio, a curva permanece praticamente constante para qualquer valor da densidade de corrente.

A consequência disto é que, por exemplo, no processo de furação por ECM os grandes valores de densidade de corrente ocorrem na face frontal da ferramenta, onde o arranque de material é desejado. Nas laterais da ferramenta, onde a densidade de corrente é menor, e por conseguinte menor eficiência de corrente (quando utilizando a Nitrato de Sódio), ocorrerá menos arranque de material, o que é desejado. Este fato não ocorre com o NaCl , podendo ocorrer a remoção de material onde não se deseja.

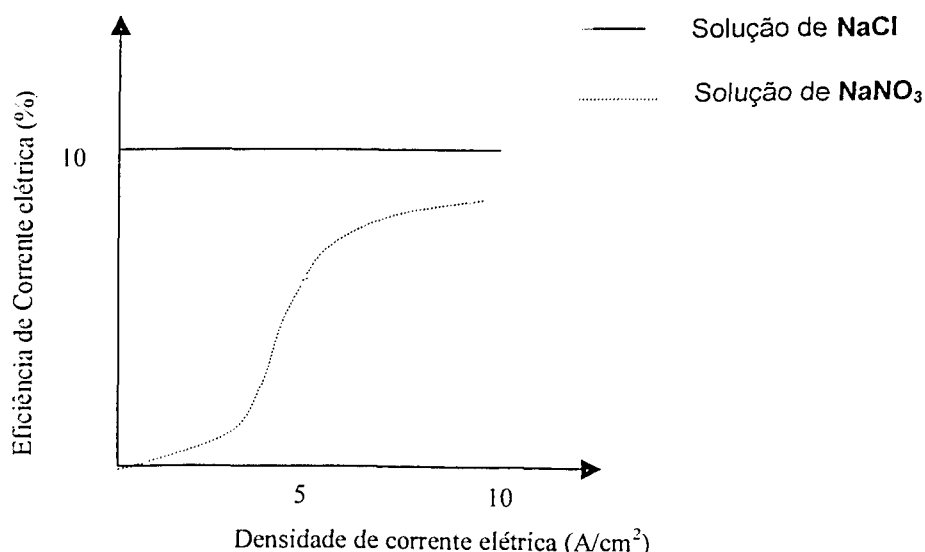


Figura 2.13 - Representação gráfica das curvas características de eficiência de corrente por densidade de corrente das soluções de NaCl e NaNO_3 [McGeough, 1988]

Limpeza do eletrólito

As impurezas afetam a resistência do gap ao modificar a resistividade do eletrólito (conforme expressão 2.11) e portanto influenciam na eficiência do processo, bem como altera a geometria da superfície usinada.

Segundo **Benedict (1987)** os detritos, oriundos da usinagem, afetam não somente a qualidade superficial, mas também pode causar curto-circuito entre a ferramenta e a peça. Portanto estas impurezas devem ser removidos do eletrólito para evitar que estes se alojem na interface ferramenta-peça. Um sistema de filtragem eficiente, ligado em série na linha do circuito eletrolítico, pode eliminar tais problemas.

Temperatura do eletrólito

Brandi (1974), afirma que na retificação eletroquímica a temperatura do eletrólito afeta a densidade de corrente, mas sua real contribuição é no aumento da taxa de ionização do eletrólito e conseqüente aumento da atividade química entre os ions metálicos e os ânions eletrolíticos. No entanto este aumento contribui para

Velocidade e vazão do Eletrólito

Efetivamente a velocidade do eletrólito é influenciado principalmente pela velocidade de rotação (w) da ferramenta (rebolo), mesmo se a direção do jato chocar tangencialmente ao rebolo. Segundo **Kozak et all (1998)** um intenso fluxo do eletrólito através do gap, assegura um processo eletroquímico estável, remove os produtos da usinagem e o calor gerado. Este fluxo é conseguido com o eletrodo rotativo trabalhando com velocidade periférica de corte de aproximadamente 15 m/s.

Segundo **Cole (1978)**, até um certo valor da taxa do fluxo eletrolítico, existe uma inter-relação proporcional entre este fluxo e a densidade de corrente, em concordância com a lei de Faraday. O processo de dissolução eletroquímica do anodo é limitado pelo gap e pela taxa limite do fluxo eletrolítico.

Forças tangenciais e normais

Segundo Kozak et al (1998), uma característica da usinagem eletroquímica com eletrodo rotativo é a baixa carga exercida na peça de trabalho, o que permite sua aplicação em peças de baixa rigidez (paredes finas). Devido aos efeitos químicos e mecânicos, possíveis microdurezas na superfície são eliminadas, reduzindo as forças tangencial e normal.

Concentração do eletrólito

Segundo o Machining Data Handbook (1980), a concentração do eletrólito vai influenciar na sua condutibilidade elétrica, de acordo com o sal diluído nesta solução, conforme figura 2.14.

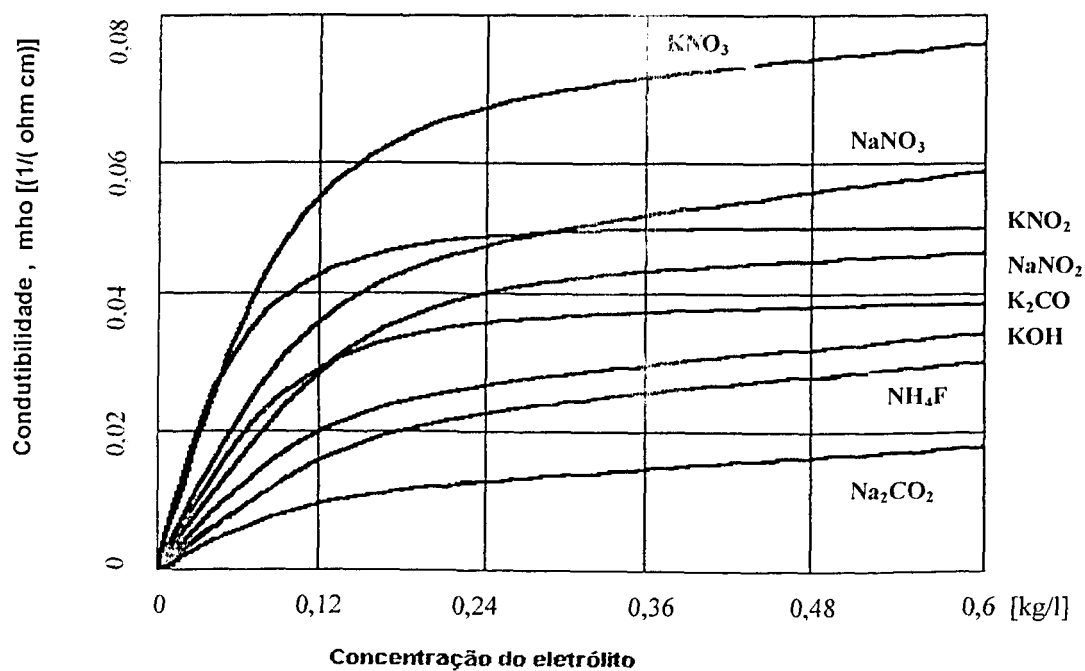


Figura 2.14 – Condutividade elétrica versus concentração de eletrólitos utilizados na retificação eletroquímica (ECG). [Machining Data Handbook, 1980]

2.4 - Desempenho do Processo de Retificação Eletroquímica

O desempenho do processo de usinagem eletroquímica pode ser avaliado através do seu produto, qual seja, os resultados obtidos pela usinagem ECG representados nas figuras 2.9 e 2.10. Tais resultados do processo podem ser medidos e comparados com aqueles encontrados na literatura, possibilitando a verificação do seu desempenho ou mesmo o controle dos parâmetros de entrada em função dos resultados desejáveis.

Portanto após ter revisto os fatores que influenciam os resultados da usinagem por ECG, pode-se agora rever os principais resultados da retificação eletroquímica, inter-relacionadas segundo as ações eletrolítica e mecânica, conforme ilustra a figura 2.15:

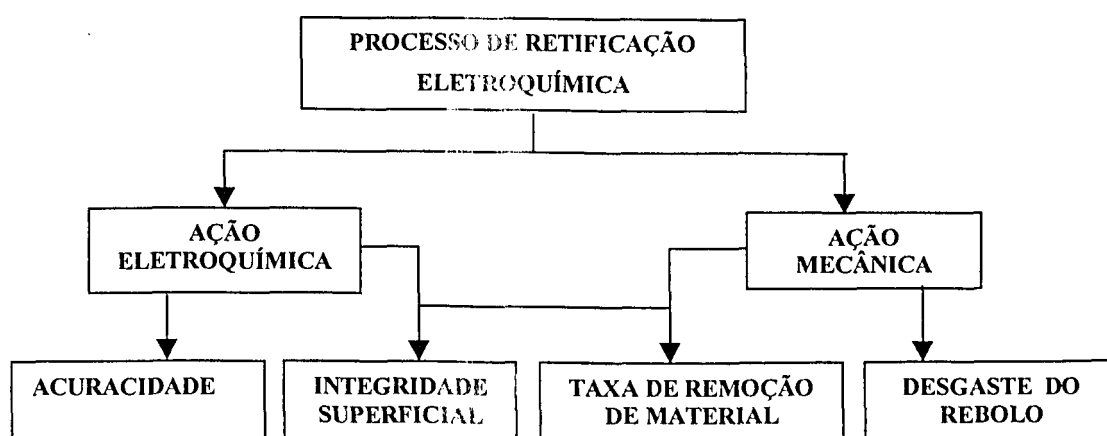


Figura 2.15 - Inter-relação dos resultados do processo de usinagem por ECG

Neste fluxograma tem-se os conjuntos dos principais resultados obtidos pela usinagem ECG segundo as ações mecânica e eletroquímica.

Taxa de remoção de material devido à ação eletroquímica

Sendo a taxa de remoção de material (TRM) a quantidade volumétrica de metal removido em um intervalo de tempo, tem-se:

$$TRM = \Delta V / \Delta t \quad (2.14)$$

Onde,

$\Delta V \Rightarrow$ volume de metal removido

$\Delta t \Rightarrow$ tempo gasto para removê-lo

Como: $\rho = \Delta m / \Delta V$ (2.15)

Onde,

$\rho \Rightarrow$ massa específica da liga

$\Delta m \Rightarrow$ massa de metal removido

a TRM pode ser dada por:

$$TRM = \Delta m / \rho \Delta t \quad (2.16)$$

Segundo **Kuppuswamy e Venkatesh (1978)**, a taxa de remoção de material é função da composição química do material da peça de trabalho e é diretamente proporcional a corrente. Contando que a corrente tenha uma eficiência de 100%, pelas leis de Faraday's, tem-se:

- (i) a massa da substância liberada na eletrólise é proporcional a intensidade de corrente;
- (ii) a massa da substância liberada é proporcional ao equivalente eletroquímico do material sob usinagem.

Desta forma, o valor de Δm pode ser expresso por:

$$\Delta m = E_e I \Delta t \quad (2.17)$$

Onde :

$E_e \Rightarrow$ equivalente eletroquímico da liga

$I \Rightarrow$ intensidade de corrente elétrica

Combinando-se (2.16) com (2.17), tem-se:

$$TRM = E_e I / \rho \quad (2.18)$$

onde:

$$E_e = \frac{1}{F} \cdot \sum_{i=1}^p \frac{X_i \cdot A_i}{Z_i} \quad (2.19)$$

em que:

$F \Rightarrow$ constante de Faraday = 96.500 Coulomb

$A_i \Rightarrow$ peso atômico do elemento químico i da liga metálica

$Z_i \Rightarrow$ valência do elemento i da liga metálica

$X_i \Rightarrow$ percentagem do elemento i na liga metálica

Das equações 2.12 e 2.18, tem-se que:

$$TRM = \frac{E_c US_g}{\rho r S} \quad (2.20)$$

De acordo com **Phillips (1985)**, onde o filme de óxido não for imediatamente removido, pela ação mecânica, a ação química paralisa. Desta forma, vai haver remoção somente onde a superfície da peça de trabalho está em contato eletroquímico com o rebolo. A taxa de transformação química depende acima de tudo do fluxo de corrente elétrica entre o rebolo e a peça de trabalho.

Uma grande intensidade de corrente elétrica implica numa rápida taxa de transformação química, e conseqüentemente uma alta taxa de remoção de material. A intensidade de corrente elétrica pode ser aumentada, até certo ponto, pelo aumento da tensão. A intensidade de corrente elétrica e a taxa de remoção de material aumenta linearmente, até subitamente ocorrer um violento arco elétrico e centelhamento.

Isto ocorre quando a diferença de potencial entre os eletrodos excede a capacidade do material conduzir. Subitamente, o processo ECG se transforma em EDM (usinagem por descargas elétricas), resultando em severo "pitting" em ambos os eletrodos. Dependendo do tipo de rebolo usado e do material da peça de trabalho, esta mudança ocorre entre 10 e 15 volt.

Segundo este autor, a TRM para uma dada intensidade de corrente elétrica é, sem dúvida, menor que o valor teórico da expressão 2.20, pois as variações na temperatura, propriedades metalúrgicas e reatividade eletroquímica do eletrólito afetam esta taxa. O método mais seguro, segundo o autor, para determinar a TRM é por testes empíricos.

Textura superficial

Na usinagem eletroquímica (ECM), a integridade superficial de uma peça depende, principalmente, do seu material, do eletrólito a ser utilizado e das condições de operação. Um estudo de parâmetros como densidade de corrente, dimensão do *gap* e o tipo do eletrólito é de suma importância para se obter boa integridade. Segundo **Benedict (1987)**, a seleção

imprópria do eletrólito ou uma densidade de corrente baixa, pode levar a uma condição conhecida como ataque intergranular. Esta condição ocorre quando o processo dissolve o contorno do grão e não o seu interior. Esta ocorrência pode causar falha por fadiga na peça.

Segundo **Geva et al (1975)** as características superficiais resultantes do processo de usinagem por retificação eletroquímica são fortemente influenciadas pela predominância da ação mecânica ou da ação eletroquímica na superfície usinada da peça de trabalho. A figura 2.16 ilustra as diferentes regiões características da interface rebolo-peça, numa retificação superficial plana. A região de "contato" é caracterizada pela ação simultânea da eletroquímica e do contato mecânico, na região "após contato" somente o aspecto eletroquímico está presente. Pelo método ilustrado na figura, isto é, retificação superficial plana, a região "após contato" é responsável pela característica da textura final da superfície.

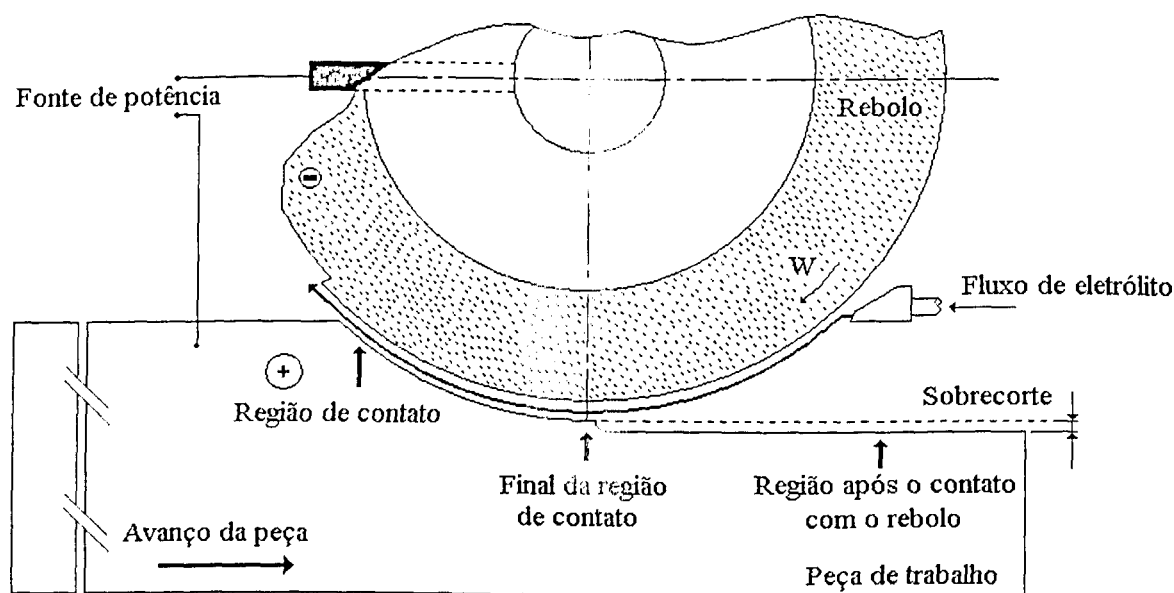


Figura 2.16 – Regiões da interface rebolo-peça caracterizadas por diferentes processos na usinagem por ECG [Geva et al, 1975]

Hahn e Lindsay (1984) descrevem que na retificação convencional o acabamento superficial da peça de trabalho é afetado primeiramente pela intensidade de força normal entre o rebolo e a peça de trabalho e as condições de dressagem do rebolo. O acabamento superficial é melhorado com a redução da intensidade de força normal. No entanto, **Kozak e Oczós (1998)** afirmam que devido aos efeitos químicos e mecânicos no processo ECG, as deformações plásticas são facilitadas, reduzindo-se assim as forças tangencial e normal.

Segundo **Rumyantsev e Davydov (1989)**, na usinagem ECG, a natureza e magnitude da rugosidade dependem da composição química e da microestrutura do material a ser usinado, os parâmetros elétricos do processo e do fluxo contínuo do eletrólito no *gap*. Para uma alta qualidade superficial é essencial fazer-se uma escolha própria da composição química do eletrólito e densidade de corrente. A ECM permite picos e vales microscópicos na superfície de trabalho; são estes picos e vales que determinam o acabamento superficial. O número e tamanho dos vales dependem do estado estrutural do material. Grandes vales ou “pits” são produzidos em ligas contidas em uma estrutura granular grosseira.

Sorkhel e Bhattacharyya (1993), afirmam que na usinagem eletroquímica (ECM) o efeito da estrutura metalúrgica do material da peça, sobretudo relativo à variação do tamanho dos grãos, tem grande influência no acabamento da superfície gerada. Entretanto, o acabamento superficial e a estrutura da superfície é fortemente influenciada pela densidade de corrente.

O aumento do limite de resistência à fadiga que ocorre em componentes usinados eletroquimicamente se deve principalmente às altas densidades de corrente. Os vários parâmetros do processo, como dinâmica do escoamento, concentração e taxa do fluxo do eletrólito e a densidade de corrente elétrica, bem como o valor do *gap*, operam como importante papel no acabamento da superfície da peça. Os vários macro defeitos produzidos na superfície da peça usinada por ECM são devidos principalmente às mudanças na valência de dissolução do material da peça durante o curso da operação de usinagem.

Em aços e ligas que têm uma estrutura granular fina e, especialmente, em aços tratados termicamente, ECM produz pequena rugosidade superficial. Um aumento na densidade de corrente produz uma grande qualidade superficial porque a diferença no potencial de dissolução entre o componente de liga é reduzida. A qualidade superficial na ECM pode ser controlada através de ajustes dos parâmetros elétricos e fluidos-dinâmicos.

Segundo **Phillips (1985)**, o acabamento superficial está relacionado com a metalurgia da peça de trabalho. Quando o processo ECG é usado corretamente com voltagem e taxa de alimentação apropriada, obtém-se um bom resultado da superfície. Isto geralmente resulta em um acabamento superficial. Uma granulometria fina do rebolo e/ou um eletrólito diferente pode ser também requerido para alcançar o desejado acabamento. A aparência normal da superfície é uma camada escura causada pelo óxido residual. Esta camada é muito macia e fina, facilmente removível da superfície usinada.

Conforme **Kozak et al (1998)**, o polimento e acuracidade da superfície usinada aumenta com o aumento da velocidade de avanço V_f , veja figura 2.17.

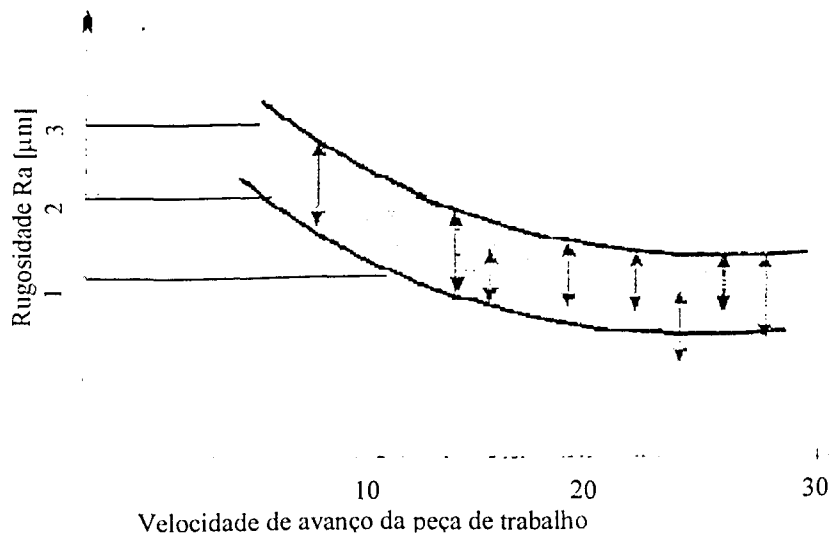


Figura 2.17 - Efeito da velocidade de avanço da peça de trabalho (V_f) na rugosidade Ra [Kozak et al, 1998]

Assim a velocidade de alimentação aumenta até um certo valor crítico onde ocorre descarga elétrica acompanhada por faúlhas. Isto deteriora a qualidade superficial e causa desgastes eletroerosivos do eletrodo de trabalho. A probabilidade de acidente elétrico é diretamente relacionado com a ocorrência de camadas de vapor de gás e a intensidade de campo elétrico no *gap*. Deste modo, a evaporação intensa causada por aquecimento e aumento do volume do gás emitido durante a ECM é considerado ativador de descarga elétrica.

Conforme **Marty (1971)**, a qualidade do acabamento superficial é uma das notáveis vantagens da ECM. Mas a obtenção de um bom estado da superfície depende:

- do fluxo do eletrólito, que deve ser o mais uniforme possível. O escoamento turbulento é preferível ao laminar porque não provoca formação de sulcos ou de rugas;
- da natureza do eletrólito que pode provocar uma dissolução preferencial de uma das fases da mistura ou do aglomerado de grãos do material da peça. É assim que o carbono contido nas matrizes pode não ser dissolvido. No caso de material não homogêneo, os elementos que tenham um potencial eletrolítico menor, seja pelo fato da natureza, seja pela sua estrutura, são dissolvidos mais rapidamente; por outro lado, um grão de material que tenha um potencial eletrolítico superior àquele do conjunto, será submetido a uma densidade de corrente menor e formará uma protuberância sobre a superfície. Estas considerações mostram

que se a diferença de potencial crescer com a densidade de corrente, estas variações locais de potencial farão um efeito menor;

A figura 2.18 mostra a variação da rugosidade R_a em função da intensidade de corrente para diferentes aços.

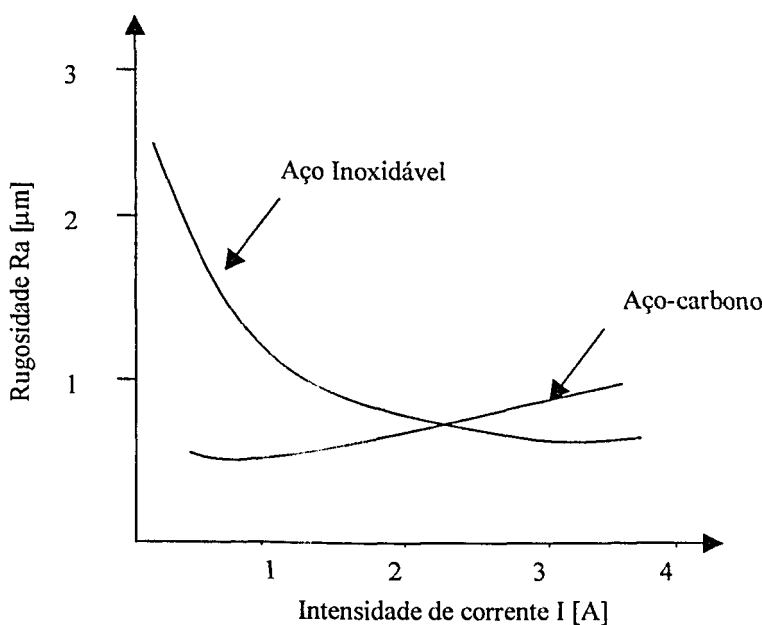


Figura 2.18 – Variação da rugosidade em função da intensidade de corrente para o aço-carbono e aço inoxidável [Marty, 1971]

De acordo com Kozak e Oczós (1998) durante a usinagem do carboneto sinterizado WC-Co, ocorre maior dissolução na matriz de cobalto em torno do precipitado de carboneto, resultando no enfraquecimento do vínculo metálico entre este carboneto e a matriz. Ainda segundo estes autores, outro fator adicional pode ser a geração do hidrogênio. A difusão do hidrogênio no material pode produzir mudança na tensão residual e aumento na fragilidade do material. De tal forma que o processo mencionado é seguido por mudanças nas propriedades do material da peça.

Eficiência na rebarbação

Sabe-se que a rebarbação é uma etapa bastante onerosa do processo de fabricação, mas de vital importância na qualidade de peças acabadas. As rebarbas apresentam sob várias

formas, dimensões e características irregulares além de serem de difícil remoção. Não existe procedimento padrão para remover rebarbas que, normalmente utilizam métodos manuais. Como exemplo, a rebarbação no processo de furação ocupa mais de 40% do total do tempo de usinagem e reduz a eficiência da produção, aumentando os custos. Segundo **Kim e Choi (1998)**, a obtenção de um processo adequado de rebarbação com alta eficiência é um problema de difícil solução.

Após várias pesquisas, estes autores afirmaram que a solução em potencial encontrada foi a técnica de rebarbação eletroquímica. Na usinagem ECG, o próprio processo elimina qualquer necessidade posterior de rebarbação.

Desgaste do rebolo e condições de dressagem

Assim como diversos fatores podem causar inconsistências no desempenho do processo de retificação eletroquímica, com o tempo as mudanças nas características topográficas de um rebolo podem provocar grandes variações no resultado final da operação. No caso de desgaste das arestas cortantes, os superabrasivos são poucos sensíveis ao tempo e são usados em muitas peças antes da reafiação da face do rebolo, segundo **Lindsay (1989)**.

Além disso, como sugerem **Kozak e Oczós (1998)**, a redução nas forças de usinagem é bastante significativa no desgaste do material abrasivo e proporciona notável economia nos custos de usinagem quando do uso de dispendiosos rebolos como CBN e diamante.

Pelo fato de apenas 5 a 10% do material ser removido pela ação abrasiva, a vida do rebolo é de 8 a 10 vezes maior que o rebolo de retificação convencional. Isto também faz dele ideal para retificação de forma, além da dressagem ser requerida apenas uma ou duas vezes ao dia em condições normais de trabalho.

Desta forma, economiza-se tempo de dressagem que, adicionado ao tempo de produção total, resulta no aumento da produtividade (**Phillips 1985**).

Dureza Superficial

De acordo com **Kozak e Oczós (1998)**, durante a dissolução no processo de usinagem ECG, ocorrem deformações plásticas e uma redução da microdureza superficial do material (R_e , H_v). Além da fragilização do material devido à difusão do hidrogênio. Estes fatos pode ser

melhor entendido a partir da ilustração da figura 2.19, onde tem-se a microdureza superficial (Hv), durante a dissolução anódica.

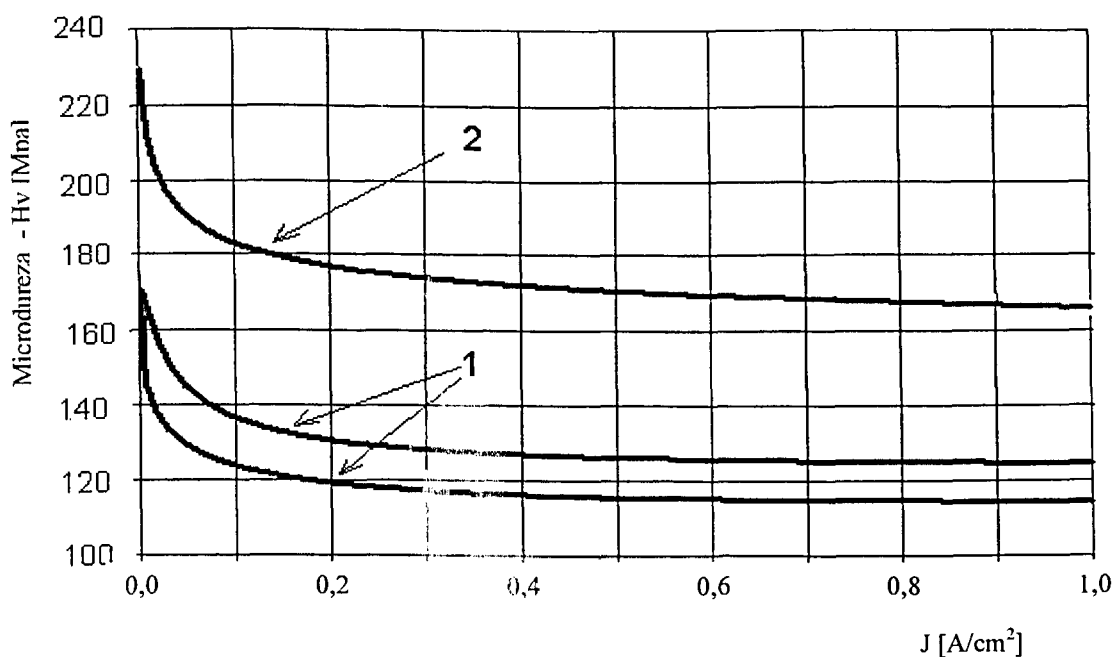


Figura 2.19 – Efeito da densidade de corrente na microdureza da superfície usinada (eletrólito: solução aquosa de NaNO_3 – 50 g/l e NaNO_2 – 10 g/l; material: Armco- curva 1, aço 3H13 – curva 2) [Kozak e Oczós, 1998]

Como pode ser visto na figura 2.19, durante a dissolução com relativa baixa densidade de corrente, ocorre uma significativa redução na HV.

Capítulo 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Como mencionado, um dos objetivos deste trabalho é a realização de ensaios experimentais da usinagem do aço ABNT M6 na retificadora eletroquímica e convencional utilizando rebolo de suprerabrasivo CBN com ligante metálico de bronze, e a avaliação posterior das superfícies obtidas pelos dois processos. Outro objetivo implícito, porém não menos importante, seria a exploração do processo de usinagem por retificação eletroquímica visando o domínio da tecnologia, a comprovação de dados da literatura, o conhecimento de detalhes pertinentes ao processo, o domínio na preparação de experimentos e análise dos resultados.

Uma série de investigações foram realizadas como pré-testes para formulação de um procedimento padrão a ser experimentado definitivamente, no qual incluem a escolha de alguns parâmetros e condições de usinagem. Os procedimentos definitivos foram utilizados para análise do efeito de vários parâmetros predominantes tais como, densidade de corrente e velocidade periférica do rebolo, na rugosidade, na taxa de remoção de material e no desgaste da superfície de corte do rebolo.

Na realização dos ensaios experimentais de usinagem eletroquímica (ECG), para posterior análise dos resultados, utilizou-se do procedimento intitulado por **Montgomery (1984)** como "planejamento fatorial de dois níveis - 2^k ". Conforme este autor os procedimentos "planejamento fatorial" são largamente aplicados em experimentos que envolvem vários fatores onde é necessário o estudo do efeito reunido desses fatores em uma resposta. Em particular, no procedimento " 2^k ", cada fator (K) tem somente dois níveis quantitativos e qualitativos. Neste caso, oferece a menor quantidade de combinações de tratamento que permitem o estudo de K fatores. Este procedimento é utilizado nos estágios iniciais de trabalhos experimentais, quando existem muitos fatores reunidos a serem examinados. Devido à existência de somente dois níveis para cada fator, deve-se assumir que a resposta é aproximadamente linear dentro do intervalo escolhido para os níveis dos fatores. Para a usinagem por ECG utilizou-se três fatores ($K=3$), perfazendo oito ($2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$) observações. Para permitir a obtenção da estimativa de erros experimentais foram utilizados duas replicações ou repetições do experimento básico, totalizando assim 16 experimentos. Na seqüência estão relacionados os fatores com os seus dois respectivos níveis quantitativos:

- Tensão aplicada (U), com os níveis: 8 e 12 V.
- Vazão do eletrólito (Q), com os níveis: 400 e 600 l/h.

Na realização dos ensaios experimentais por retificação convencional, apenas o parâmetro “velocidade do avanço do rebolo (V_f)” variou em 0,5 e 1 mm/min. A vazão do fluido refrigerante permaneceu constante e igual a 450 l/h, pois não foi possível conseguir as mesmas condições de vazão conseguidas com o fluido eletrolítico na retificação eletroquímica. Os demais parâmetros e condições empregados nos ensaios de usinagem por retificação superabrasivas foram os mesmos utilizados nos ensaios por retificação por ECG.

Este capítulo apresenta os experimentos empregados neste trabalho, os quais obedeceram ao fluxograma apresentado na figura 3.1, como segue:

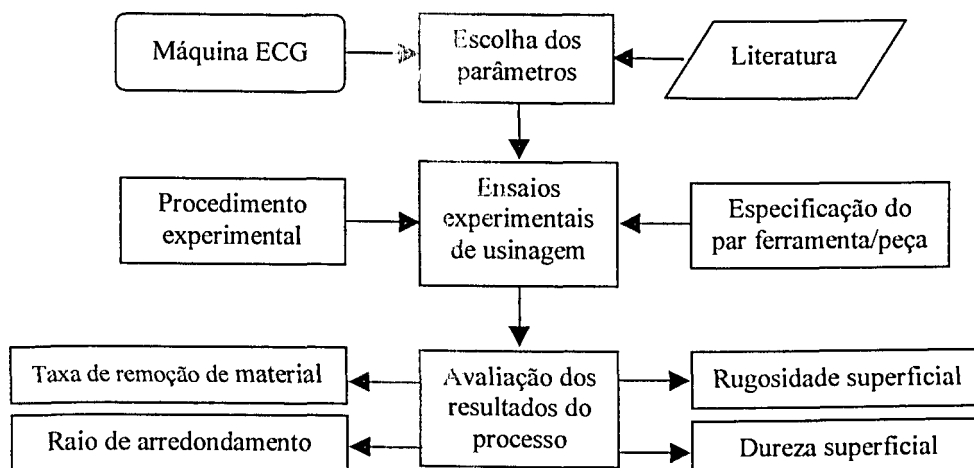


Fig. 3.1 - Fluxograma das etapas de realização dos ensaios

3.1 - Máquina ECG

O equipamento empregado foi uma retificadora eletroquímica, cujo desenvolvimento foi objeto de estudo nos trabalhos de **SILVA NETO (1999)** e **RAMOS et all (1999)**, refere à concepção da máquina ECG. Este equipamento foi obtido a partir da incorporação do circuito eletrolítico e da fonte de potência, a uma retificadora cilíndrica universal. Outros componentes foram construídos, como uma cuba eletrolítica, para isolar a área de trabalho e um porta-escovas para energização do rebolo. Foi realizado também, a conexão dos eletrodos (peça e rebolo) à fonte de potência, e o isolamento elétrico destes eletrodos do resto do equipamento.

O equipamento completo compõe-se, basicamente de:

- **circuito elétrico**, conforme mostra a figura 3.2, no qual está contida uma fonte de corrente elétrica, ilustrada pela figura 3.3;
- **circuito eletrolítico**, conforme mostra as figuras 3.4 e 3.5;
- **unidade mecânica** constituída a partir de uma retificadora cilíndrica universal, ilustrada pela figura 3.6, onde foram incorporados os circuitos anteriores e construídos componentes para isolar o eletrólito e realizar as ligações do circuito elétrico, conforme mostra a figura 3.7.

Circuito elétrico

Para possibilitar a leitura da magnitude corrente elétrica efetivamente alcançada e utilizada na usinagem, uma resistência tipo "shunt" foi ligada ao pólo positivo do circuito da fonte, conforme ilustra a figura 3.2. Um multímetro foi inserido em paralelo à resistência "shunt" para realizar a leitura da voltagem. Como a resistência do "shunt" é igual a 8 ampères por milivolts, pode-se determinar a corrente elétrica do circuito como sendo o valor lido no multímetro em milivolt multiplicado por 8, resultando o valor da corrente em ampères.

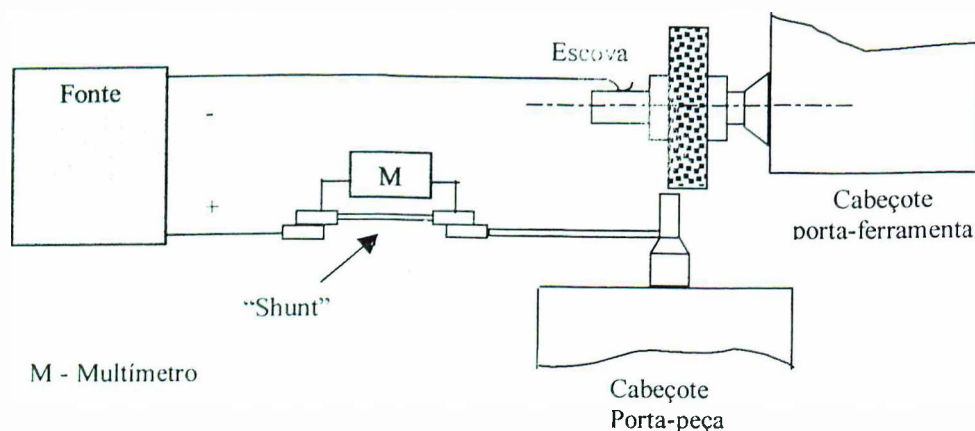


Figura 3.2 – Esquema do circuito elétrico do equipamento

A fonte de potência incorporada à retificadora e utilizada neste trabalho foi do tipo tensão constante e com fornecimento de baixa voltagem (0 a 25V) e alta amperagem (0 a 2000 A), com alto fator de potência e velocidade de resposta de sinais de controle.

Esta fonte tem as seguintes especificações do fabricante Rapid Power Co. (USA):

- entrada - 220 V, 167 A, 3 fases, 60 Ph/Hz
- saída - 0 a 25 V, 0 a 2000 A, corrente pulsada

A figura 3.3 mostra a vista principal da referida fonte de potência.



Figura 3.3 - Vista principal da fonte de potência incorporada à retificadora

Circuito eletrolítico

O circuito eletrolítico tem a função de garantir que o eletrólito permaneça com suas propriedades constantes na região do *gap*, fator determinante para que o processo tenha bom desempenho em termos de integridade superficial. Assim, o circuito tem como principais componentes: uma bomba, construída com material resistente à corrosão, um reservatório, responsável pelo armazenamento do eletrólito e um filtro no qual são retidos os detritos gerados durante a usinagem. A cuba eletrolítica, que é o local onde ocorre a usinagem propriamente dita, faz parte do circuito eletrolítico e da unidade mecânica.

Esta cuba eletrolítica foi construída de forma a acomodar o rebolo, a peça de trabalho, as ligações e o isolamento elétrico sem perder a liberdade de movimento do avanço do rebolo. A disposição das tubulações de entrada e de saída de eletrólito foram construídas de forma a permitir que toda a solução fique sujeita a um movimento de convecção. Isto homogeneiza o eletrólito a fim de manter uniforme a temperatura e a dissipação do calor, devido ao efeito *joule*. Além de ser um fator preponderante no que se refere ao impacto ambiental, a limpeza do eletrólito é fundamental para o bom desempenho da retificação eletroquímica. Também ajuda

na estabilidade da corrente que passa pelo *gap* e evita curto-circuito entre os eletrodos além de auxiliar no aumento da vida do eletrólito. A figura 3.4 mostra o circuito eletrolítico utilizado nos ensaios.

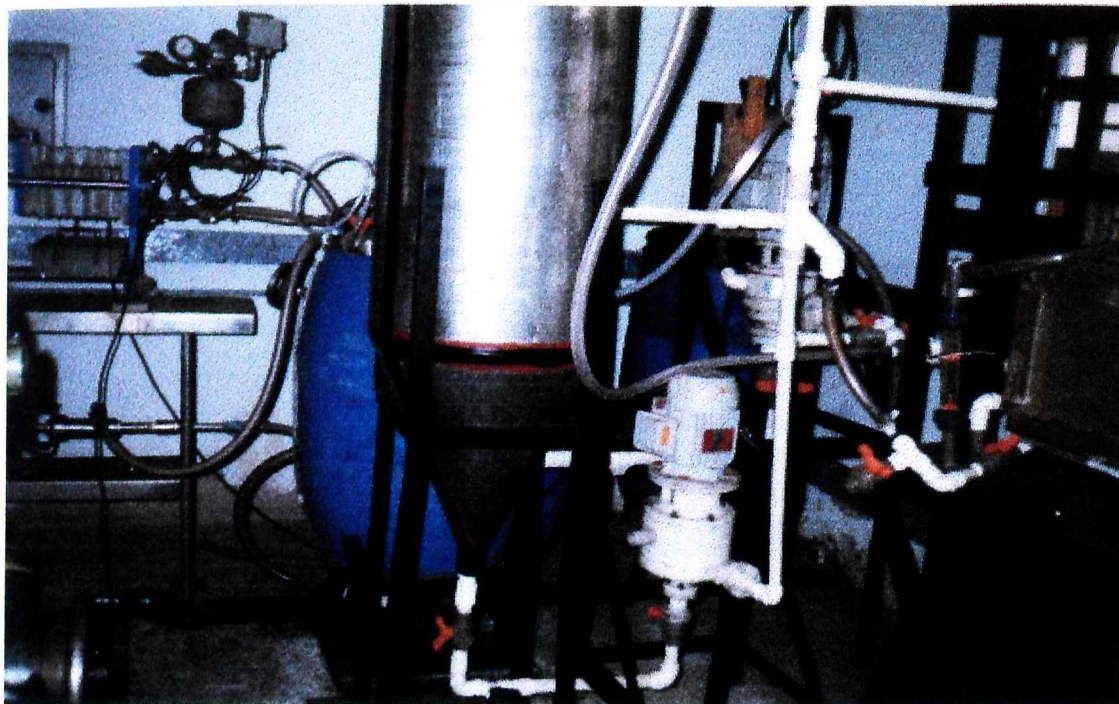


Figura 3.4 - Circuito do eletrólito incorporado ao conjunto de retificação eletroquímico

Pela complexidade e importância do assunto, a limpeza do eletrólito tem sido objeto de estudo junto aos professores e alunos da Universidade Federal de Uberlândia e em particular do laboratório não tradicional de usinagem (UNT) do Departamento de Engenharia Mecânica.

O filtro utilizado no circuito foi do tipo prensa. Este filtro consiste basicamente de várias telas de diferentes diâmetros de abertura, dispostas em sequência, de forma que, ao serem prensadas, suas extremidades formam um compartimento por onde o fluido atravessa e é filtrado. Este filtro tem o inconveniente de introduzir grande perda de carga ao sistema, ao atingir a saturação, sobrecarregando a bomba. De acordo com **Malaquias (1996)**, o filtro utilizado retira partículas maiores que $4\ \mu\text{m}$ e proporcionam uma vazão máxima de 1200 l/h, sendo que este deve ser trocado por outro ao atingir a saturação. Um reservatório decantador também auxilia o sistema de filtragem decantando e, conseqüentemente, restando as partículas grosseiras.

A figura 3.5 ilustra, de forma esquemática, o circuito eletrolítico desenvolvido pela equipe do laboratório UNT para os estudos de usinagem eletroquímica, este sistema foi também incorporado de forma intercambiável ao equipamento de retificação eletroquímica.

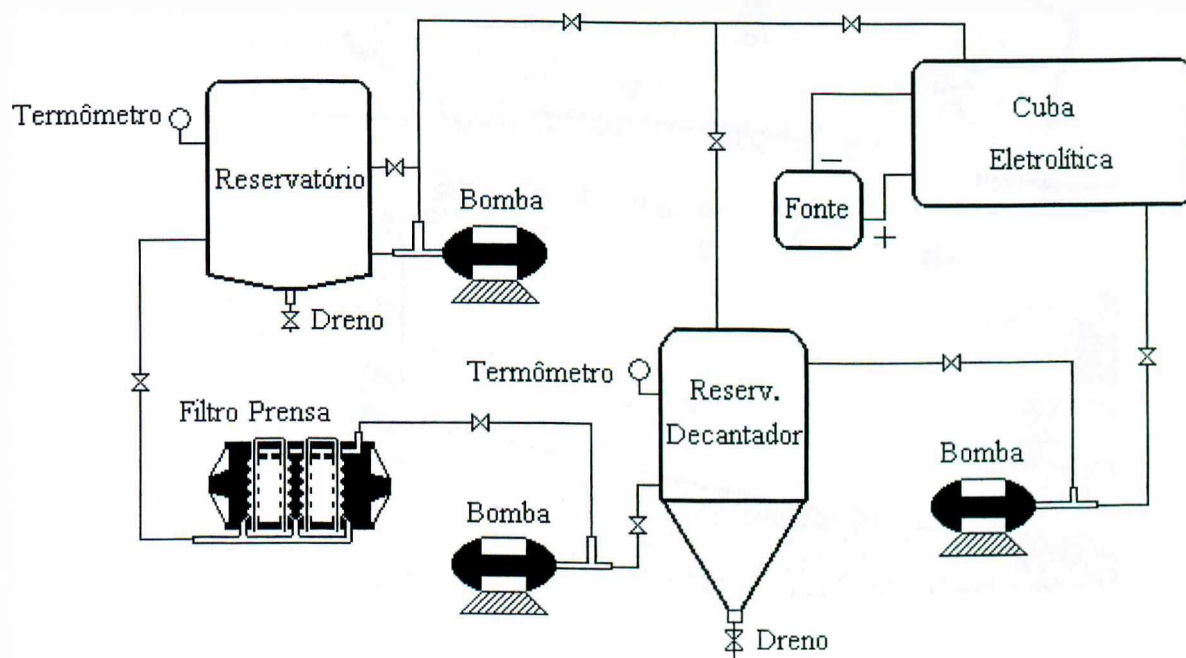


Figura 3.5 - Esquema do circuito eletrolítico [Malaquias, 1996]

Unidade mecânica

Em uma unidade mecânica, constituída de uma retificadora cilíndrica universal, como ilustra a figura 3.5, foram incorporados os circuitos elétricos e eletrolíticos. Neste equipamento foram também construídos componentes para isolar o eletrólito e realizar as ligações do circuito elétrico, com uma cuba eletrolítica e um porta-escovas, conforme mostra a figura 3.7.

A retificadora adaptada para este trabalho tem um curso transversal do cabeçote porta-rebolo é acionado por uma bomba hidráulica, cujo motor elétrico tem 4 cv e 4 pólos. A rotação do rebolo tem acionamento elétrico direto de um motor de 3 cv e 2 pólos. O óleo hidráulico localiza-se em tanque próprio, de onde é bombeado para o circuito hidráulico, para ser depois novamente descarregado.

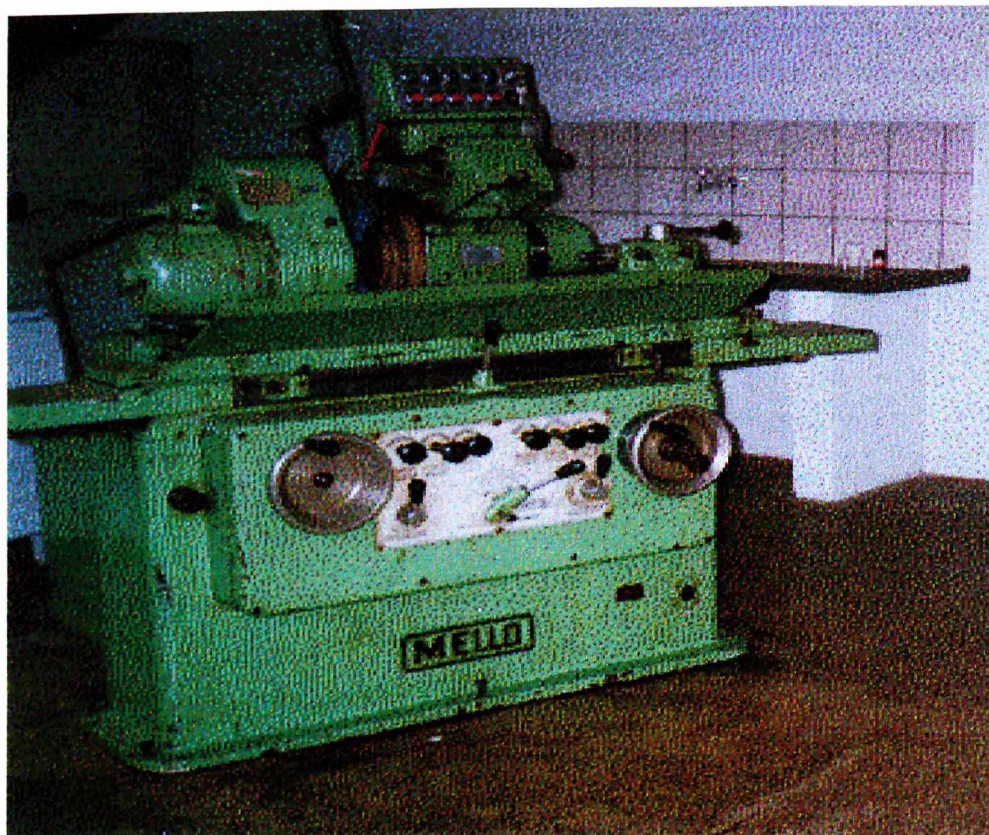


Figura 3.6 - Fotografia da retificadora cilíndrica universal utilizada na obtenção da retificadora eletroquímica

De acordo com manual da retificadora convertida, “o volante dos avanços transversais só funciona bem se o sistema hidráulico estiver ligado, uma vez que as várias folgas existentes no mecanismo de transmissão são eliminadas pela ação da pressão do óleo hidráulico”. Desta forma, antes da realização de qualquer ensaio, sempre se tomou o cuidado de aguardar no mínimo 5 minutos com a bomba hidráulica ligada ou mesmo após qualquer interrupção, mas que no intervalo fez-se uso por exemplo do movimento manual da mesa. Este tempo é suficiente para que o ar do circuito hidráulico seja eliminado e para que se inicie o processo de aquecimento do óleo hidráulico.

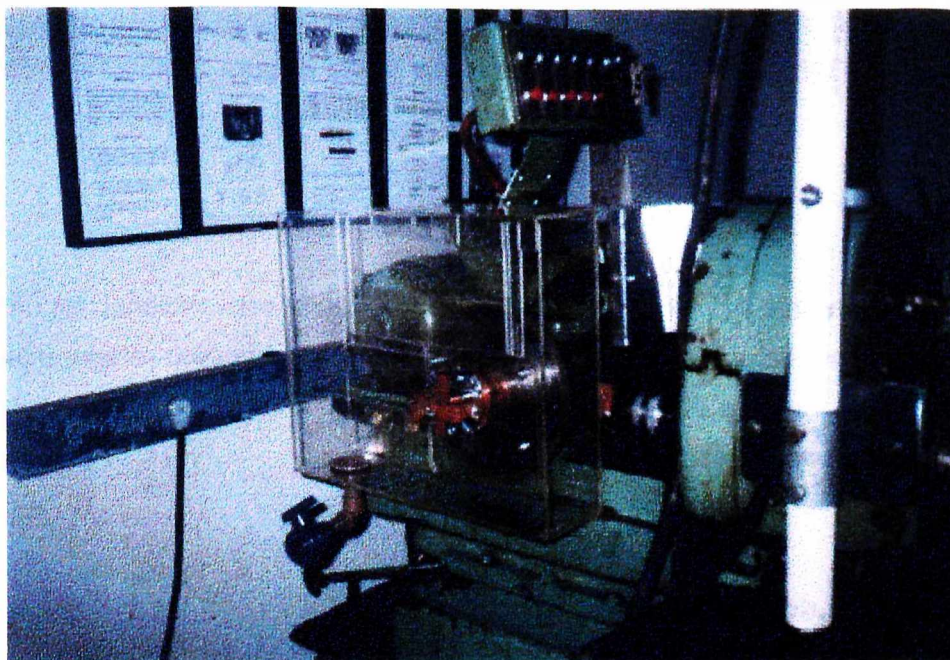


Figura 3.7 - Vista da retificadora eletroquímica com os circuitos eletroquímico e elétrico incorporados através da cuba eletrolítica e porta-escovas respectivamente

3.2 - Escolha dos Parâmetros de Entrada

Neste trabalho, os parâmetros de entrada utilizados foram escolhidos observando-se os valores citados na literatura e, principalmente, os recursos disponíveis bem como das limitações dos circuitos eletrolítico, elétrico e unidade mecânica que compõem a retificadora eletroquímica. Portanto, alguns parâmetros de usinagem ficaram restritos devido às características cinemáticas dos equipamentos incorporados à máquina ECG.

Fluido eletrolítico

Apesar de apresentar melhor condutividade elétrica que as demais, conforme mostra a figura 2.14, a solução de KNO_3 não foi utilizada por não ser um produto economicamente viável. O eletrólito utilizado foi uma solução à base de nitrato de sódio (NaNO_3) que apresenta o segundo melhor desempenho como condutor elétrico, além de ser menos corrosivo e apresentar bom desempenho no arranque controlado de material, conforme ilustra figura 2.14. A solução empregada apresenta uma concentração de 30% de NaNO_3 (com pureza eletrolítica) em peso composto de 100 Kg de água potável, portanto 130 Kg de solução. A escolha desta

concentração (300 gr/l ou 5 lb/gal) se deve ao fato da condutividade elétrica alcançar o valor máximo, em torno de 0,06 mho(1/(ohm.cm)), conforme ilustra a figura 2.14.

Fluido refrigerante

O fluido refrigerante utilizado nos ensaios de retificação convencional, foi uma mistura de água e óleo refrigerante sintético na proporção de 2 a 3 litros de óleo refrigerante para 100 litros de água. Nestes ensaios utilizou-se também, o mesmo bico ejetor e cuba utilizados nos ensaios de usinagem por retificação eletroquímica (ECG).

Velocidade e vazão do eletrólito

A vazão do eletrólito, bem como do fluido refrigerante, foram limitadas, pelo volume disponível na cuba e também pela vazão da bomba disponível. O fluxo do eletrólito foi limitado principalmente pelo filtro prensa que saturava com pouco tempo de funcionamento. A velocidade de corte do rebolo (25m/s) foi superior à do eletrólito (17m/s), garantindo o arraste deste ao atingir a interface rebolo-peça.

Posicionamento do fluxo do eletrólito

De acordo com **Benedict (1987)** o fluido eletrolítico deve ser posicionado de forma a permitir o arraste do eletrólito pelo rebolo para a saída do contato rebolo-peça, através de sua rotação. Nos pré-testes a distância do bico ejetor à superfície de trabalho do rebolo (d) e o ângulo de direcionamento do jato de eletrólito (α), conforme mostra o desenho esquemático da figura 3.8, foi variado alternadamente para se conseguir o posicionamento do fluxo do eletrólito, utilizando como critério a ocorrência, ou não, de faúlhas no contato entre rebolo e peça.

Neste teste, utilizou-se os parâmetros que permitiram condições mais "severas" de usinagem, tais como avanço de 1mm/min do rebolo, tensão da fonte de 12 V e mínima vazão (400 l/h). Os posicionamentos satisfatórios foram observados para um ângulo do jato (α) na faixa de 0 a 30° e distância (τ) com valores máximo de 100 mm. Como existiam incertezas com respeito ao funcionamento do processo e considerando o manuseio de um sistema elétrico, por questão de segurança, optou-se pela utilização da distância de 80 mm. Haja vista o risco do contato do bico ejetor, de confecção metálica, com o rebolo condutor.

Empregou-se o menor ângulo do jato ($\alpha = \text{zero}$) por ser a melhor configuração da faixa referida acima.

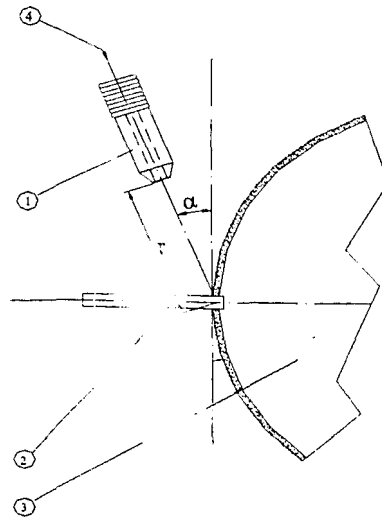


Figura 3.8 – Esquema do posicionamento do fluxo do eletrólito, detalhando a distância do bico à superfície de corte do rebolo (τ) e o ângulo de inclinação do fluxo em relação à tangente desta superfície

Avanço do rebolo

O sistema do avanço do rebolo utilizado foi muito próximo ao “avanço constante do rebolo” já mencionado e ilustrado pela curva “t” da figura 2.12. Contudo, este avanço foi limitado de forma a evitar a condição de curto-circuito entre os eletrodos. O sistema de avanço não foi alterado após a transformação, ou seja, continuou o mesmo avanço automático hidráulico-mecânico da unidade mecânica básica.

Tensão da fonte

A tensão foi regulada de forma a evitar curto-circuito entre a peça e o rebolo. As tensões utilizadas (8 e 12 V) foram escolhidas após testes de capacidade do sistema. Ao utilizar a tensão de 15 V detectou-se curto-circuito entre os eletrodos.

Relação dos parâmetros de entrada de acordo com o processo

As condições de retificação para os testes estão agrupados segundo os processos de usinagem na tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Parâmetros utilizados nos ensaios

Usinagem	Parâmetros	Valores
Superabrasiva	Vazão fluido refrigerante (Q)	450 l/h
Superabrasiva e Eletroquímica	Operação de retificação	tangencial cilíndrica de mergulho com a mesa parada
	Velocidade de avanço do rebolo (V_f)	0,5 e 1,00 mm/min
	Velocidade máxima do eletrólito	16,8 m/s
	Velocidade de corte do rebolo	24 m/s
	Distância do bico ejetor à superfície de trabalho do rebolo	80 mm
	Direção do jato de eletrólito na superfície de trabalho	tangencial
	Bico ejetor	Metálico; formato circular; ϕ 6,3 mm de diâmetro interna
	Rebolo	Reto- CBN 150N()M
	Material do rebolo	Nitreto de Boro Cúbico (CBN), ligante metálico de Bronze, alma metálica de aço ABNT 1030
	Peça	Bits redondo ϕ 8x25 mm (63 a 64 HR _c ou 772 a 800 H _v)
	Material da peça	Aço rápido ABNT M6 (superkobalt 12%)
Eletroquímica	Composição da peça (elemento de liga - %)	Co-12; Cr-4,25; Mo-5; W-6,2; V-1,9; C-0,9
	Área da seção transversal	$\cong 0,45 \text{ cm}^2$
	Eletrólito	Solução aquosa de NaNO ₃
	Concentração do eletrólito	300 g/l
	Vazão do eletrólito (Q)	400 e 600 l/h
	Tensão da fonte (U)	8 e 12 V

3.3 Procedimento Experimental

A operação utilizada para este experimento foi a retificação cilíndrica de mergulho com a mesa parada. Esta operação de usinagem foi escolhida devido a vários fatores que, simultaneamente, ofereciam maior facilidade na transformação da máquina, melhor agilidade operacional e por possibilitar a construção de uma cuba eletrolítica mínima sem danificar o restante da máquina.

Pela figura 3.9 pode-se observar a fixação da peça, através de um mandril (5/8"; 17mm), presa na mesa através do cabeçote porta-peça.

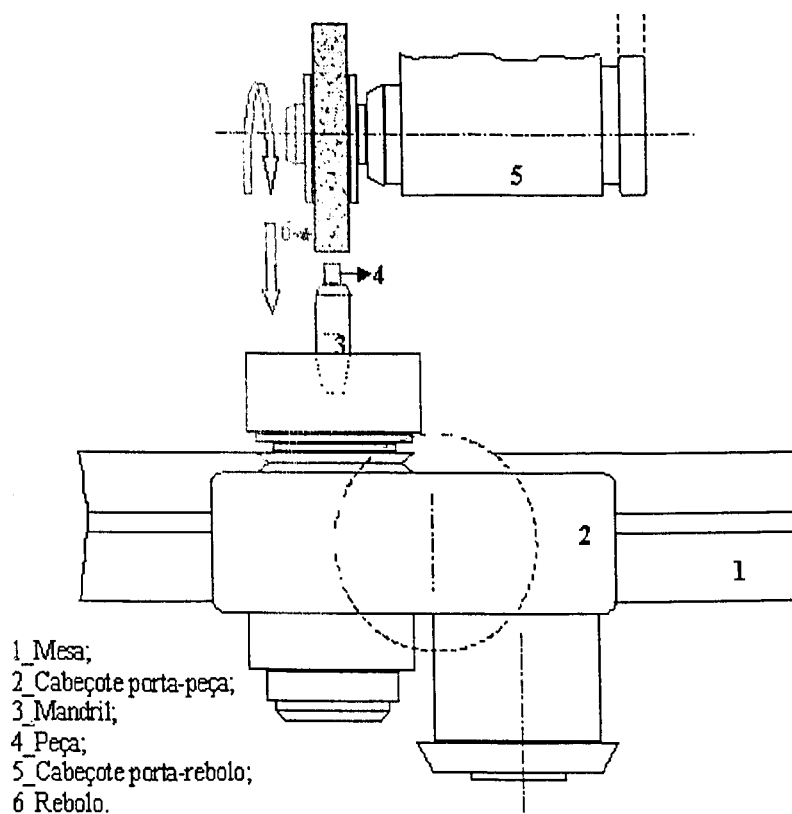
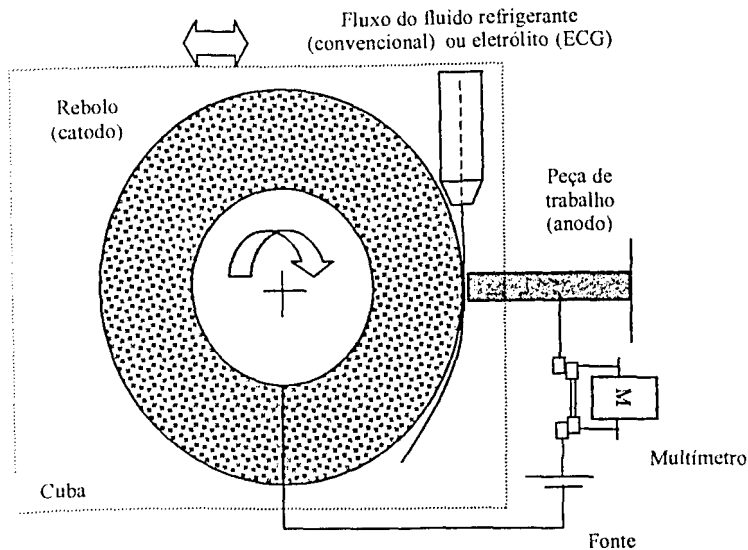


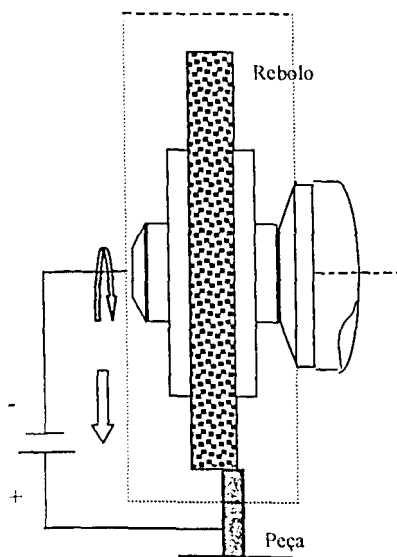
Figura 3.9 - Fixação da peça na retificadora.

Conforme ilustram as figuras 3.9, 3.10 e 3.11, nesta operação de usinagem o rebolo, com uma rotação constante, se aproxima da peça com velocidade de avanço também constante. A retirada de material, pela ação do rebolo contra a peça de trabalho, determina um arco de contato do rebolo na superfície frontal da peça que será posteriormente examinada, conforme ilustra esquematicamente a figura 3.12. Esta figura faz parte da montagem do processo cujo conjunto completo está disponível no anexo 2.

A figura 3.10 apresenta um esquema operacional dos ensaios de usinagem e a figura 3.11, a seqüência utilizada.



a) vista lateral



b) vista superior

Figura 3.10 - Esquema operacional dos ensaios experimentais de usinagem

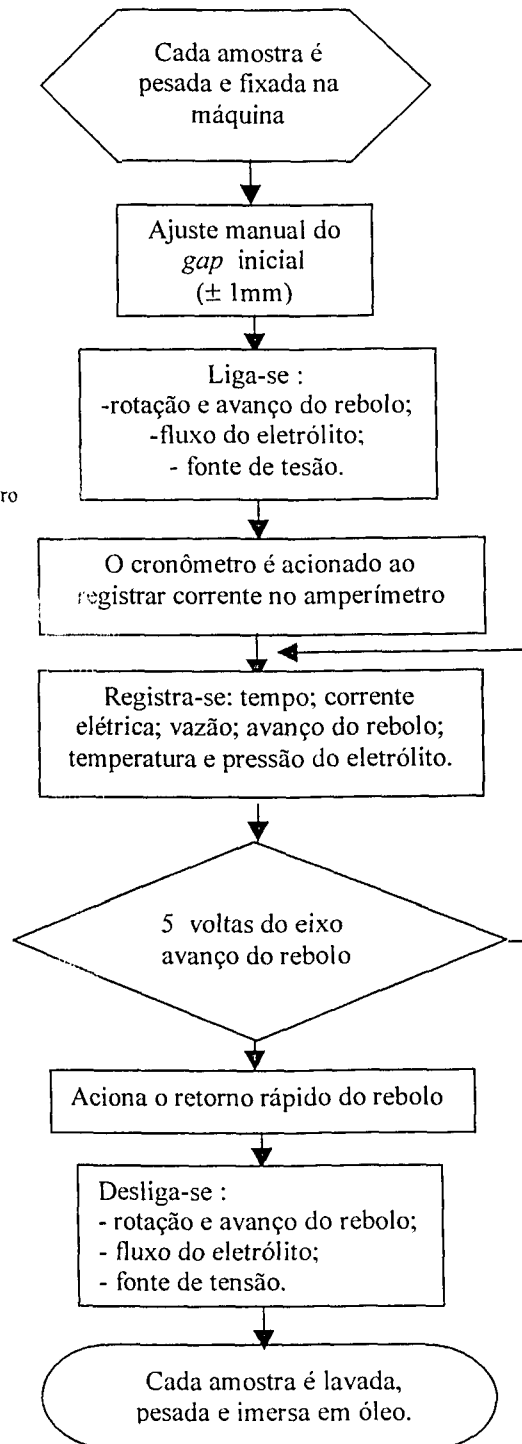


Figura 3.11 - Seqüência operacional dos ensaios experimentais de usinagem

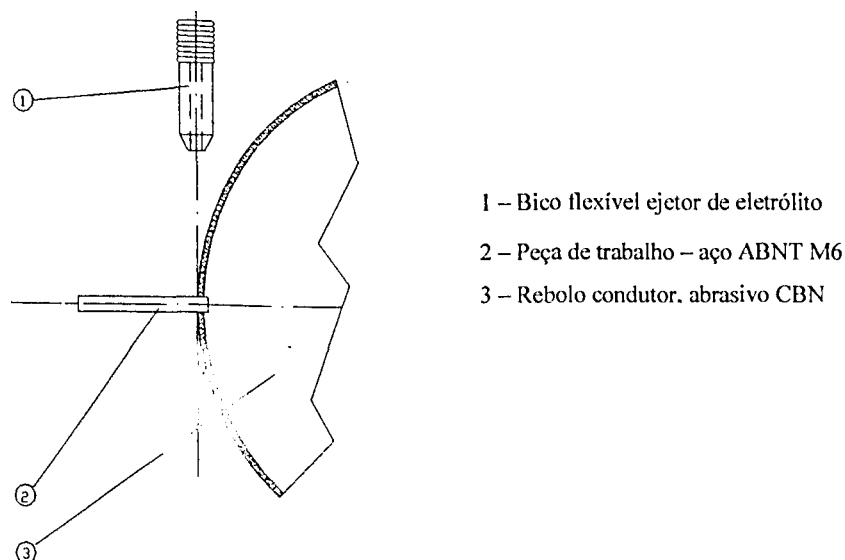


Figura 3.12 – Esquema da área de usinagem detalhando a configuração empregada nos ensaios

3.4 - Especificação do par ferramenta/peça

O material da peça de trabalho é de difícil usinagem por processos convencionais e largamente utilizados na manufatura de ferramentas. Neste experimento ele foi empregado como corpo de prova e usinado conforme ilustra a figura 3.10. Nos ensaios de usinagem convencionais utilizou-se a mesma montagem da figura 3.10, porém, com a fonte desligada e empregando o bico para ejetar o fluido refrigerante (óleo emulsivo + água). Neste caso o aço M6 foi empregado como peça de trabalho. Nos ensaios de usinagem por ECG a fonte de tensão foi devidamente acionada e o bico utilizado para ejetar o fluido eletrolítico.

Considerando-se que nestes ensaios o uso do rebolo superabrasivo CBN é bastante limitado e que o ligante metálico tem boas características no sentido de retenção dos grãos abrasivos, acredita-se que seja desnecessária uma operação de reafiação do rebolo. **Kozak e Oczos (1998)** sugerem que considerável redução nas forças de usinagem é fator significativo no desgaste do respectivo material abrasivo, e provém notável economia nos custos de usinagem quando do uso de dispendiosos rebolos de abrasivos como CBN e diamante.

Desta forma, análises dos parâmetros usuais de desgaste do rebolo como volume do rebolo desgastado, volume específico do rebolo desgastado, relação G de retificação, média de perda radial não foram realizados neste trabalho, tendo em vista que não foram detectadas perdas da massa do rebolo quando do seu levantamento, antes e após a realização dos ensaios, utilizando balança de precisão.

3.5 - Resultados dos Processos de Usinagem por Retificação Eletroquímica e Convencional Superabrasiva

O resultado prático do processo de usinagem por retificação eletroquímica e convencional foi avaliado conforme estrutura oferecida, como por exemplo equipamentos disponíveis no laboratório UÑT. E de forma a relatar as principais características detectadas e observadas nas superfícies resultantes daqueles processos.

Taxa de remoção de material (TRM)

Neste trabalho a TRM foi calculada de forma experimental, utilizando a expressão 2.15, como sugerido por **Phillips (1985)**.

As amostras foram pesadas antes e após a usinagem, utilizando uma balança analítica com as seguintes especificações:

marca: OHAUS

modelo: AS 120 S

fabricante: OHAUS Corporations - USA

precisão: quatro casas decimais

capacidade: 122 gramas

Rugosidade superficial

Para análise da rugosidade superficial fez-se uso da média aritmética (R_a) do módulo da área do perfil de rugosidade em relação à linha média utilizado. Para isso foi empregado um rugosímetro "Taylor Hobson", modelo "Surtronic 3+" gentilmente cedido pelo laboratório de materiais. Os procedimentos aplicados foram determinados pela norma ISO 4287/1, adequado ao aparelho. Desta forma foi empregado 0,8 mm como comprimento de onda limite que define

a curva característica de filtragem para a operação, conhecido pela sigla inglesa “cut-off” (λ_c), e o percurso de medição (l_n) foi de 2,4 mm.

Raio de Arredondamento externo (r_a)

O raio de arredondamento externo foi obtido a partir da média aritmética das duas menores distâncias (d_1 e d_2) entre os alinhamentos das duas superfícies (lateral de corte) da peça de trabalho até suas paralelas ao término da curva formada entre elas. Estas distâncias foram lidas em um aparelho do tipo projetor de perfil, gentilmente cedido pelo laboratório de metrologia, cujas especificações estão relacionadas a seguir:

modelo: MP 320

fabricante: “Carlzeiss Jena”

precisão: 0,005 mm

capacidade de leitura: 0 - 25 mm

Desgaste do rebolo

Análises minuciosas da variável desgaste do rebolo como volume do rebolo desgastado, volume específico do rebolo desgastado, média de perda radial não foram realizadas neste trabalho, tendo em vista que não foram detectadas perdas consideráveis da massa do rebolo quando do seu levantamento, antes e após a realização dos ensaios experimentais pelos dois processos de usinagem. Para este levantamento foi empregada uma balança analítica com três casas decimais de precisão com capacidade para 5000 gramas.

Capítulo 4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os principais resultados obtidos estão relacionados na tabela 4.1, tabela esta retirada da planilha de cálculo constante do anexo I. Os ensaios 1 e 2 são relativos à usinagem por retificação superabrasiva e os ensaios de 3 a 10, relativos à usinagem ECG.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de usinagem em barras de aço ABNT M6 com rebolo condutor de CBN

Unid. →	Parâmetros de entrada			Resultados dos Processos							
				Variáveis Dependentes			Parâmetros de Avaliação dos Processos				
	V_f	U	Q	I	$J = I/S_a$	R	TRM	TRM _e	R _a *	r _a	HV *
Ensaio	mm / min	V	L/h	A	A/cm ²	Ω	mm ³ /min	cm ³ /min.100A	μm	mm	HV10/30
			x1000	média ± Δ	média ± Δ	média	média ± Δ		média ± Δ	média	média ± σ
1	0,5		0,45				19,02 ± 3,3		1,2 ± 0,1	0,0	860 ± 21
2	1		0,45				45,25 ± 0,71		1,3 ± 0,1	0,0	860 ± 19
3	0,5	8	0,6	12,4 ± 0,6	28 ± 1,3	0,65 ± 0,03	21,97 ± 0,28	0,18	0,7 ± 0,2	0,15	792 ± 57
4	0,5	8	0,4	12,8 ± 2,3	28 ± 5,1	0,63 ± 0,14	19,98 ± 0,91	0,16	0,9 ± 0,3	0,16	815 ± 33
5	0,5	12	0,6	11,8 ± 0,8	26 ± 1,8	1,02 ± 0,04	21,04 ± 0,79	0,18	0,6 ± 0,2	0,21	842 ± 38
6	0,5	12	0,4	12,2 ± 2,0	27 ± 4,4	0,98 ± 0,10	22,49 ± 1,39	0,19	0,6 ± 0,1	0,20	844 ± 41
7	1	8	0,6	27,6 ± 1,7	61 ± 3,8	0,29 ± 0,08	42,37 ± 0,51	0,15	0,7 ± 0,2	0,14	856 ± 19
8	1	8	0,4	25,8 ± 3,1	57 ± 6,9	0,31 ± 0,15	44,75 ± 3,56	0,18	0,4 ± 0,1	0,13	867 ± 16
9	1	12	0,6	26,8 ± 1,7	59 ± 3,8	0,45 ± 0,08	43,52 ± 0,04	0,16	0,6 ± 0,2	0,19	860 ± 14
10	1	12	0,4	23,0 ± 4,2	51 ± 9,3	0,52 ± 0,21	38,24 ± 3,30	0,17	0,5 ± 0,1	0,13	858 ± 52

V_f = velocidade de avanço do rebolo; U = tensão da fonte; Q = vazão do eletrólito; I = intensidade de corrente elétrica; J = densidade de corrente elétrica; R = resistência elétrica entre a peça de trabalho e o rebolo *gap*; TRM = taxa de remoção do material; TRM_e = TRM específica; R_a = rugosidade média aritmética; r_a = raio de arredondamento externo; $HV 10/30$ = dureza Vickers obtida num ensaio em que foi aplicado uma força de 10 kgf por 30 segundos; Δ = desvio máximo; σ = desvio padrão; (*) ensaios onde foram realizados 4 repetição para cada amostra (8 repetições por ensaio).

Nesta tabela tem-se os parâmetros de entrada que também podem ser chamados de variáveis independentes. São os casos de V_f (velocidade de avanço do rebolo), U (tensão elétrica da fonte) e Q (vazão do eletrólito). Os resultados da usinagem foram divididos entre aqueles da sinergia dos processos, no caso I (Intensidade de corrente), J (densidade de corrente elétrica) e R (resistência elétrica entre o rebolo e a peça) e os parâmetros comumente

usados para avaliação do desempenho do processo, no caso a TRM (taxa de remoção de material), a TRM_e (taxa de remoção de material específica ou TRM por unidade de corrente elétrica), o acabamento superficial medido por R_a (rugosidade média aritmética), r_a (raio de arredondamento externo da seção retificada) e H_v (microdureza da peça medida em dureza Vickers).

Conforme mencionado, foi utilizada uma replicação para obter uma estimativa do erro, isto é, para cada ensaio numerado na primeira coluna da tabela foram realizados dois experimentos.

Os subitens a seguir apresentam as respectivas análises e discussões dos principais resultados obtidos.

4.1 – Variáveis Dependentes do Processo (I , R , J)

Nas figuras 4.1 a 4.3 são apresentadas as influências dos parâmetros de entrada V_f , Q e U nas variáveis dependentes do processo I , R e J , respectivamente.

Na figura 4.1 nota-se que I varia muito pouco com Q (vazão do eletrólito) e com U (tensão da fonte) mas varia muito com V_f (velocidade de avanço do rebolo). Esses resultados são condizentes com os preconizados para o processo ECG mediante as seguintes considerações. Pela figura 2.5, curva 2, válida para soluções de $NaNO_3$, vê-se que I , na região próxima ao ponto F varia muito pouco com E que no caso é praticamente igual a U . Variando-se U de 8 para 12 V, não se obteve uma variação significativa de I . O que houve foi uma sistemática mas pequena diminuição de I (cerca de 5 a 12%) quando se passa de 8V para 12V, uma diferença menor que o desvio máximo de corrente (cerca de 5 a 18%).

A grande influência de V_f sobre I já era esperada também pela expressão (2.12), página 24, pela qual $I = (U \cdot S_a) / (r \cdot S)$. Ora, sendo S_a e r praticamente constantes, apenas U e S poderia influenciar no valor de I . Como U já foi demonstrado que influi muito pouco sobre I , apenas a variação de S poderia modificar o valor da corrente. Acontece que S é altamente dependente de V_f . Seu valor é inversamente proporcional a ele pois quanto maior o valor de V_f mais rapidamente o rebolo se aproxima da peça provocando menores valores médios de S , com o que provoca grandes aumentos de I para os casos ensaiados (cerca de 12 A para $V_f = 0,5$ mm/min e cerca de 25 A para $V_f = 1,0$ mm/min). Este aumento da velocidade V_f é seguida por aumento na participação abrasiva do processo, mas acredita-se que esta participação se estabilize após um certo valor da velocidade conforme simulação do processo ECG, realizado por Kozak e Oczós (1988) e sintetizado no gráfico da figura 2.11 (página 21).

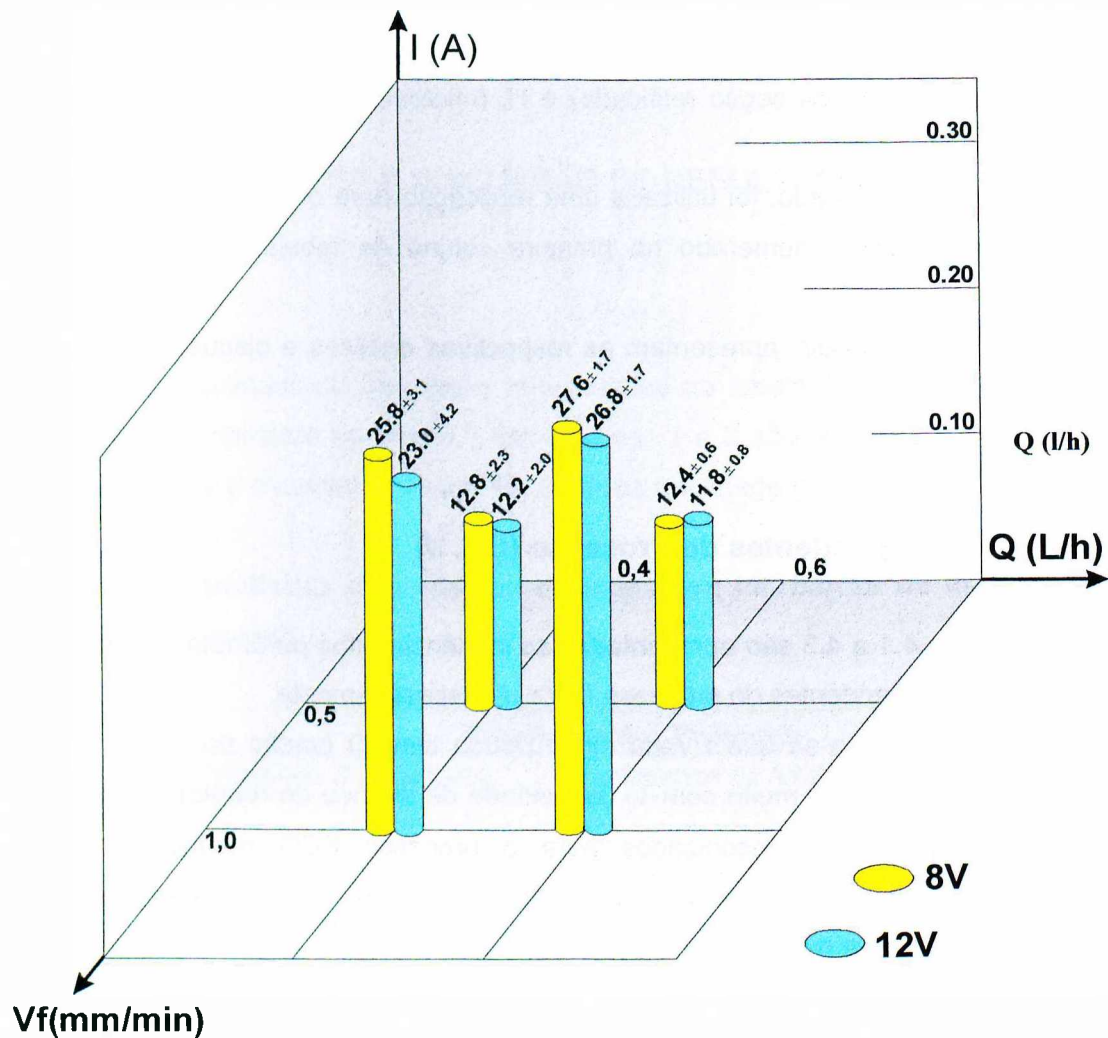


Figura 4.1 – Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na intensidade de corrente

A figura 4.2 onde se tem a resistência do circuito (que como se sabe praticamente se confunde com a resistência do *gap*) em função de V_f , Q e U , vê-se que R varia muito com V_f e razoavelmente com U mas quase não sofre influência de Q .

O valor de R diminuiu cerca de 100% quando se passou de $V_f = 0,5$ para 1,0 mm/min e cerca de 55 a 67% quando se passou de 8 V para 12 V. Menos de 7% foi a diferença nos valores da resistência ao se variar Q de 400 a 600 l/h.

A análise anterior feita para explicar o aumento da I com o aumento de V_f serve também para explicar o aumento de R com a diminuição de V_f tendo em vista que $R \cong R_{gap} = (r \cdot S)/S_a$. Como S é maior para $V_f = 0,5$ mm/min que para $V_f = 1,0$ mm/min, R também deve aumentar na mesma proporção (100%), já que r/S_a permanecem constante com a variação de Q e U .

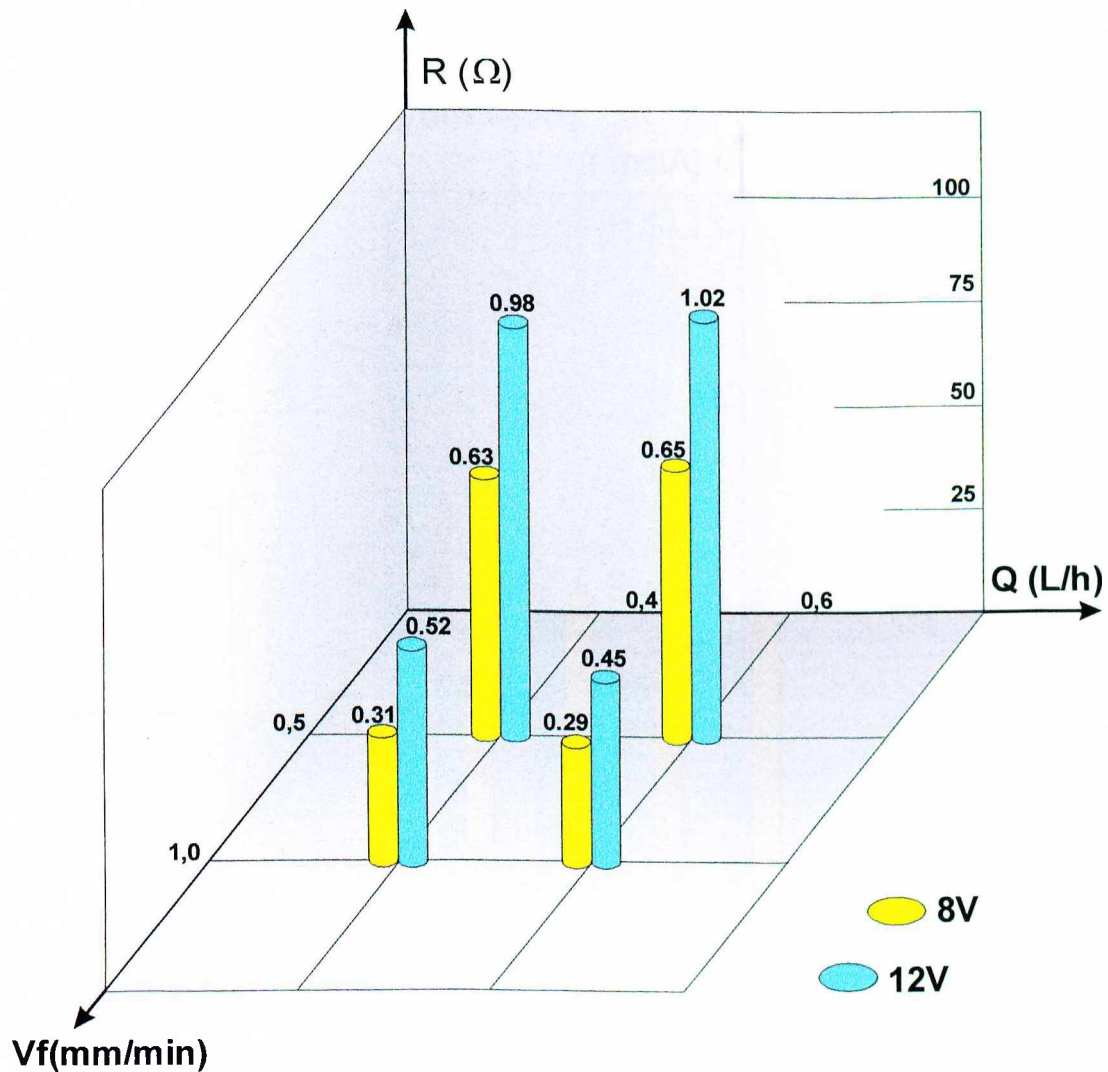


Figura 4.2 – Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na resistência do gap

A variação de R com U pode ser explicada pela expressão (2.10), página 23, pela qual $R_c = U/I$. Como I fica praticamente constante quando se varia U de 8 V para 12 V, o valor de R deveria mesmo aumentar num valor em torno de 50% (55% a 67% no caso dos resultados experimentais).

Na figura 4.3 pode-se observar que a exemplo da intensidade de corrente, independentemente da tensão aplicada na fonte, a densidade de corrente não sofreu variações visíveis para o mesmo avanço do rebolo. Segundo **Bhattacharyya (1973)** esta é uma condição que deve ser satisfeita para garantir efetividade no método de usinagem por ECG. Conforme este autor, “independentemente da variação da carga de alimentação da fonte, a densidade de corrente deve ser mantida constante”.

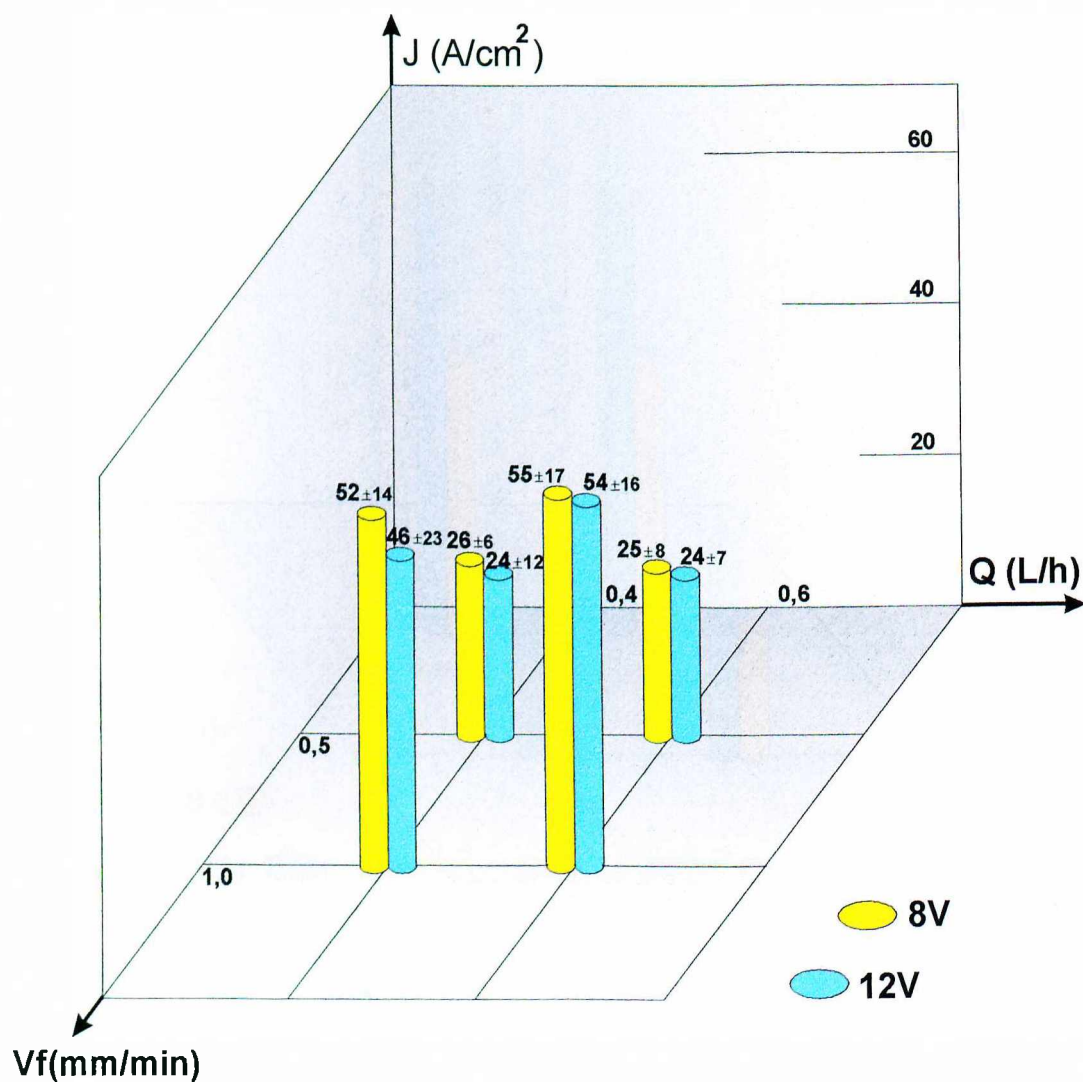


Figura 4.3 – Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na densidade de corrente

4.2 - Taxa de Remoção de Material

Na figura 4.4 tem-se o resultado da TRM média para os dois processos em função dos parâmetros de entrada. Conforme é fácil de se constatar, a TRM depende basicamente do avanço V_f , em ambos os processos.

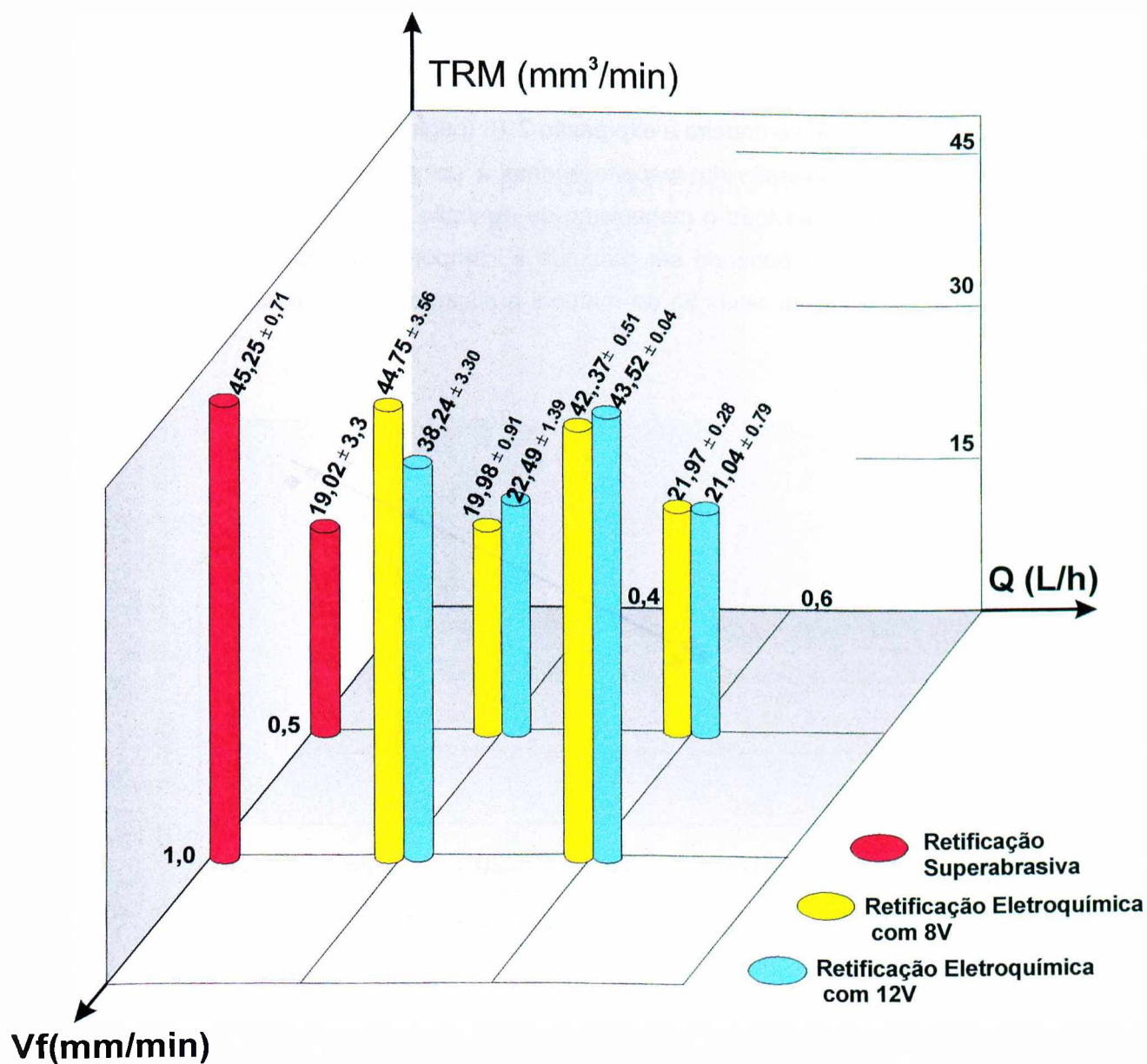


Figura 4.4 – Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na Taxa de Remoção Material (TRM)

Para o caso da retificação superabrasiva isto é esperado pois V_f é o único parâmetro a influenciar, tendo em vista que Q e U não são pertinentes ao processo. Como teoricamente $TRM = S_a \cdot V_f$ e S_a é aproximadamente $0,45 \text{ mm}^2$, a TRM deveria resultar em aproximadamente $22,5 \text{ mm}^3/\text{min}$ e $45,0 \text{ mm}^3/\text{min}$, respectivamente. As diferenças entre os valores da TRM para os mesmos avanços, ilustradas no gráfico pelo desvio máximo, se deve aos erros experimentais. Portanto, pode-se esperar que a TRM seja igual para os dois processos se desprezarmos tais erros. Percebe-se portanto que a TRM é limitada pela velocidade constante do avanço do rebolo. Esta velocidade é uma característica cinemática do equipamento incorporado à máquina ECG.

Para o processo ECG, a TRM segue uma correlação muito estreita com I , conforme mostra a figura 4.5, mostrando-se verdadeira a expressão 2.18 (página 30) pela qual a TRM é proporcional a I . Como essa expressão diz respeito apenas à componente eletroquímica do processo, é de se supor que quase todo o mecanismo de remoção se deva a ela, e apenas uma porcentagem muito pequena podendo ser atribuída à componente abrasiva. Como na intensidade da corrente, também na remoção do material praticamente não sofreu influência das variações de Q e U .

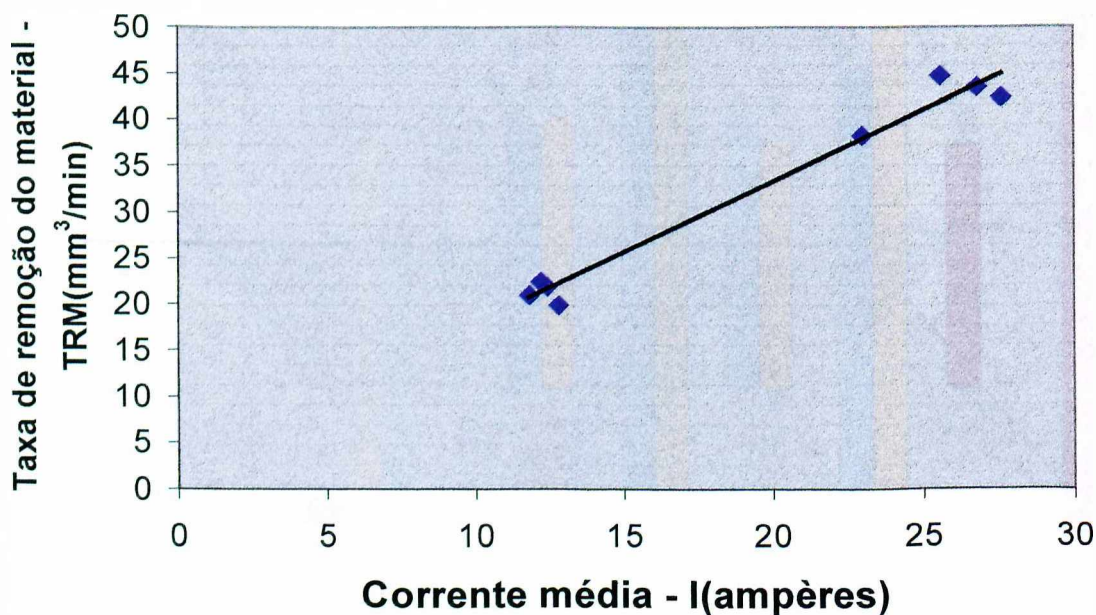


Figura 4.5 – Correlação entre a TRM e a I

4.3 – Taxa de Remoção Específica de Material (TRM_e)

Conforme a figura 4.6, a taxa de remoção de materiais por 100 A está, para todos os casos, entre 0,15 e 0,19 cm³/min.100 A. Esta é uma faixa próxima do valor de 0,17 cm³/min por 100 A mencionado no **Machining Data Handbook (1980)** e de 0,16 cm³/min por 100 A de corrente mencionado no trabalho de **Drozda (1983)**, para os casos de usinagem ECG bem conduzidos.

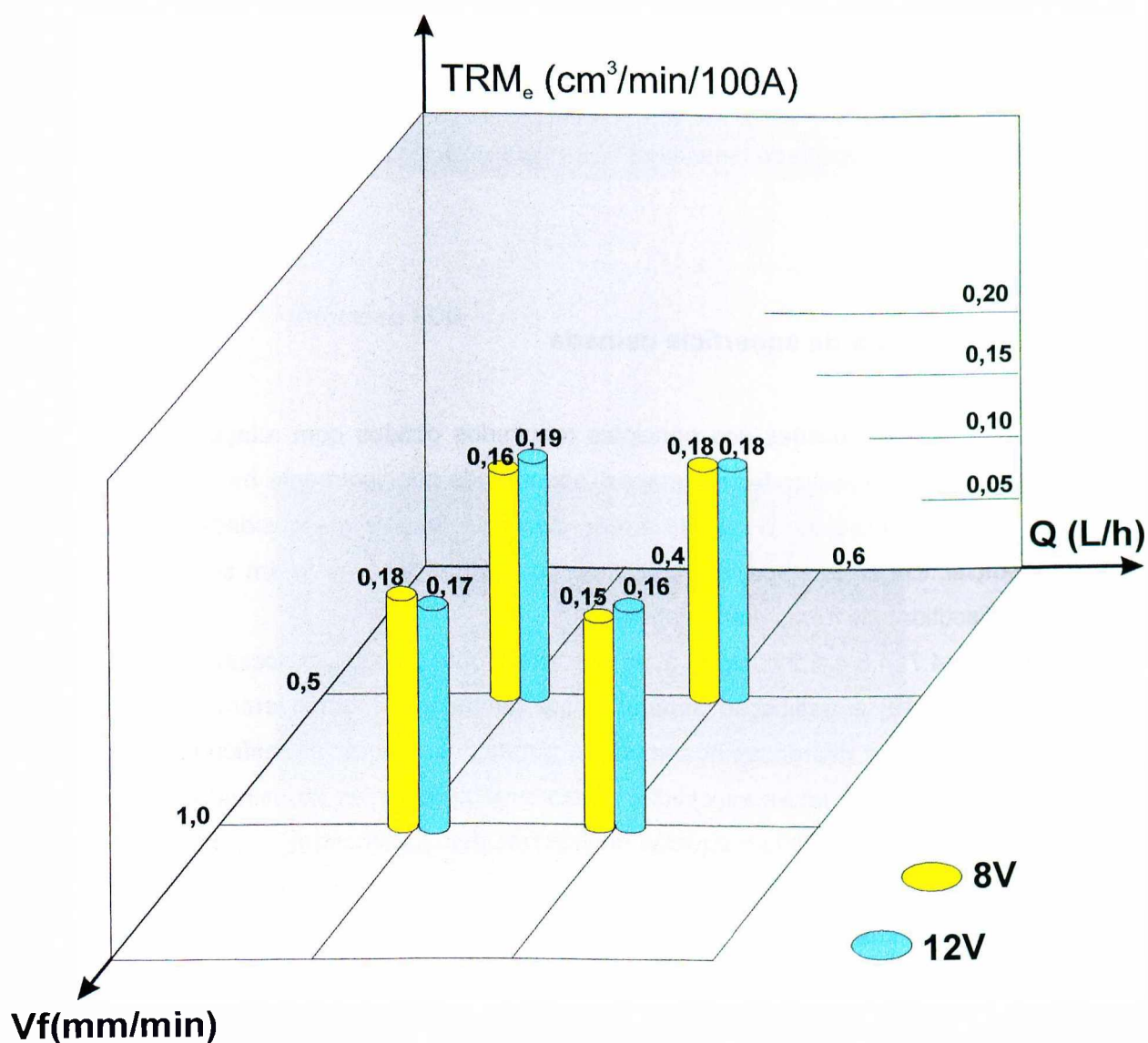


Figura 4.6 – Influência dos parâmetros de entrada (V_r, Q e U) na Taxa de Remoção Específica de Material (TRM_e)

Outra constatação deste trabalho está relacionada com a estabilidade do processo de usinagem por ECG na remoção do material. Em todos os experimentos, foi observado através das medições da intensidade de corrente que esta se estabiliza no início da usinagem. Ou seja, a corrente inicia em zero e atinge um regime permanente após um pequeno intervalo inicial de tempo (± 3 segundos), com pequenas oscilações de amplitude neste intervalo. Ocorre, desta forma, um auto-ajuste entre os parâmetros de entrada e as variáveis dependentes do sistema ECG, ilustrado na figura 2.10.

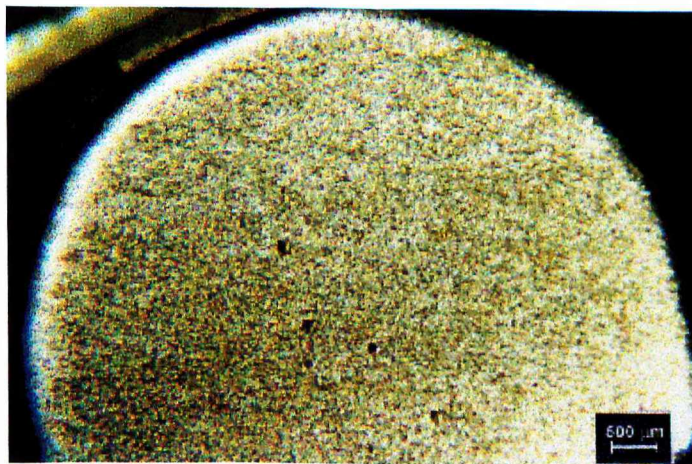
De modo geral, percebe-se a ocorrência da estabilização do sistema logo após ligada a máquina ECG. Desta forma, ao término da terceira etapa da sequência operacional dos ensaios experimentais de usinagem, conforme ilustrado na figura 3.11, o *gap* se estabiliza. Esta estabilização ocorre de forma idêntica à observada nos processos ECM, com o avanço constante da ferramenta, ilustrado pela curva “t” da figura 2.12, conforme **McGeough, 1988**.

4.4 - Aspectos gerais da superfície usinada

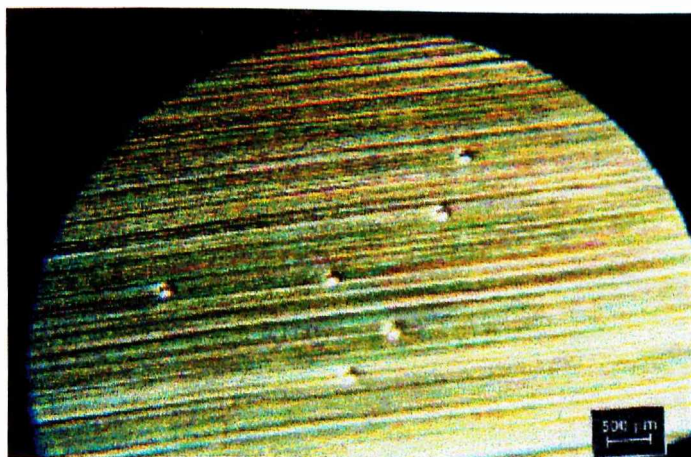
As análises e discussões dos principais resultados obtidos com relação à textura da superfície usinada foram realizadas em etapas, observando principalmente os aspectos gerais da superfície usinada incluindo o raio de arredondamento, depois a rugosidade e, por fim, a dureza superficial. Em cada etapa, os resultados dos dois processos foram simultaneamente analisados e discutidos de forma comparativa.

As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 ilustram duas amostras obtidas pelos processos de usinagem por ECG (amostra 19) e retificação superabrasiva (amostra 2) com diferentes ampliações. Cada figura evidencia as diferenças nos aspectos gerais das superfícies retificadas pelos dois processos. Estas amostras foram escolhidas aleatoriamente entre as 20 usinadas e, de modo geral, suas superfícies representam aquelas obtidas nas demais amostras usinadas pelos seus respectivos processos de retificação.

Na figura 4.7 nota-se que a textura da superfície usinada por ECG não apresenta os riscos preferenciais verificados na retificação superabrasiva. Isto implica em grandes diferenças comportamentais da peça em trabalho, com vantagem significativa para a usinagem por ECG, principalmente para os casos de solicitação dinâmica. Outro aspecto, digno de nota, é a geometria arredondada e sem rebarbas da peça usinada por ECG, o mesmo não acontecendo com a peça usinada por retificação superabrasiva que contém cantos vivos e rebarbas.



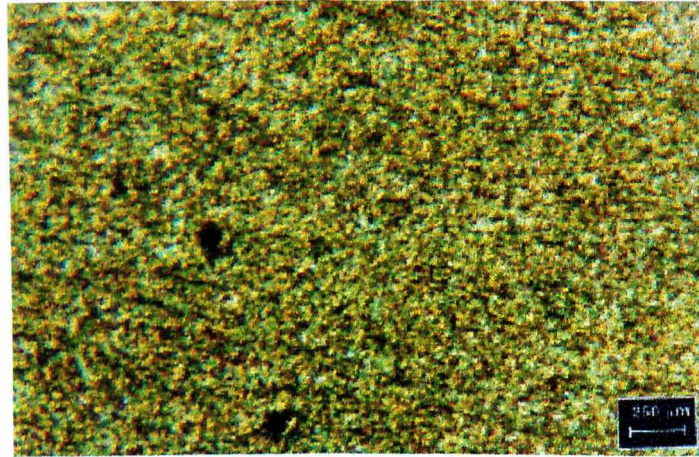
a) Processo ECG



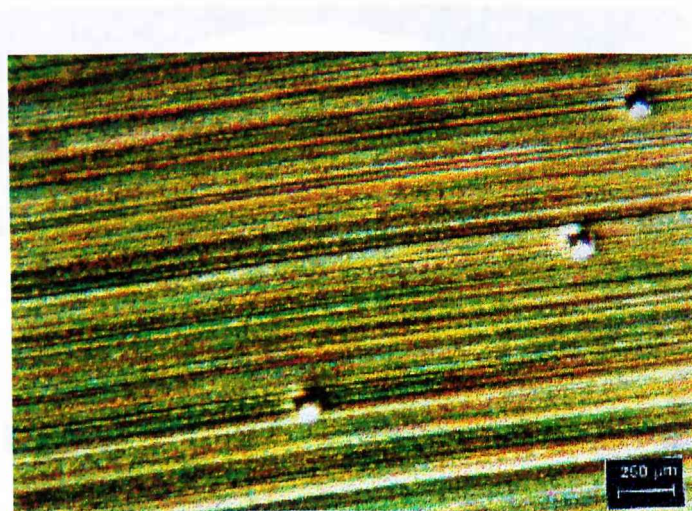
b) Retificação convencional superabrasiva

Figura 4.7 – Aspectos das superfícies obtidas pelos processos de retificação eletroquímica (a) e convencional superabrasiva (b), em uma ampliação de aproximadamente de 20 X

Na figura 4.7, pode-se visualizar com mais clareza que na peça usinada por ECG tem-se um fundo escuro, nas indentações. Enquanto estas são lisas e brilhantes na retificação superabrasivas, na ECG ela é escura com a presença de resíduos eletroquímicos, causados pela oxidação (Phillips, 1985).



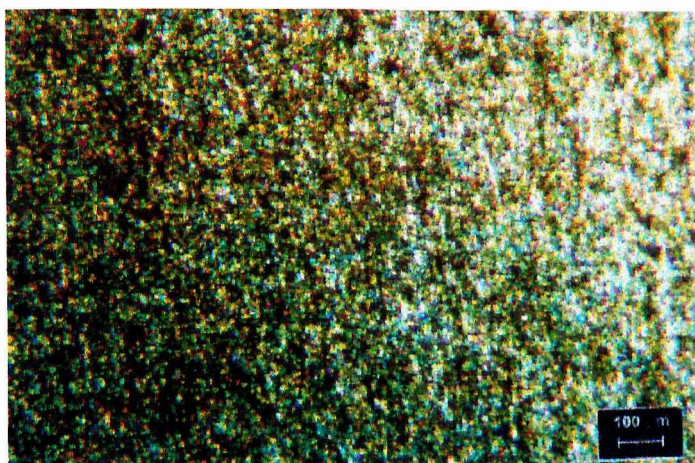
a) Processo ECG



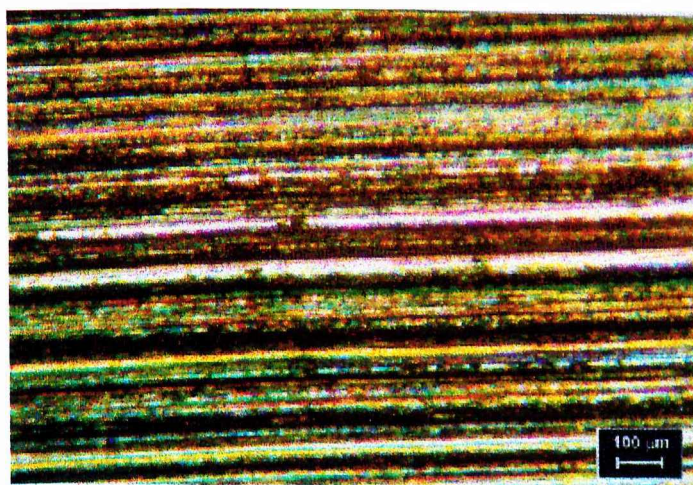
b) Retificação superabrasiva

Figura 4.8 – Aspectos das superfícies obtidas pelo processo de retificação eletroquímica a) e superabrasiva (b), em uma ampliação de aproximadamente 45 X

A figura 4.8 torna mais visível a diferença de rugosidade proporcionada por ambos os processos. É perceptível que a rugosidade na superfície obtida pela retificação superabrasiva é bastante superior àquela obtida por ECG, em coerência com os dados da tabela 4.1 que confirmam os resultados da literatura (Kozak et al, 1998).



a) Processo ECG



b) Retificação superabrasiva

Figura 4.9 – Aspectos das superfícies obtidas pelo processo de retificação eletroquímica (a) e superabrasiva (b), em uma ampliação de aproximadamente 90X

O raio de arredondamento externo médio de todas as amostras obtidas pela usinagem por retificação eletroquímica foi de 0,16 mm, enquanto que na usinagem por retificação superabrasiva não houve arredondamento de cantos.

Como neste trabalho foi utilizado o método “tangencial com a mesa parada”, o movimento de alimentação se limitou à aproximação do rebolo contra a peça e imediato recuo após desligado a fonte de tensão. Assim, o movimento de alimentação da peça representado na figura 2.16 foi nulo. Desta forma, pode-se perceber que a região de “contato” referida pela mesma figura, é praticamente inexistente. Além disso, as dimensões das peças utilizadas foram pequenas quando comparadas às dimensões do rebolo, conforme mostra a figura 3.12.

Desta forma conclui-se que a participação eletroquímica nos ensaios realizados foi ainda maior que a do processo descrito na figura 2.16 (retificação superficial plana). Portanto, a região “após contato” prepondera em muito sobre a região de “contato”. Em outras palavras, prepondera a ação eletroquímica sobre a ação mecânica. Acredita-se que na usinagem por ECG, pelo método utilizado neste trabalho, o processo de remoção de material seja puramente eletroquímico. Neste caso o rebolo apenas arranca as camadas de óxidos normalmente passivadoras, no que contribui grandemente com a estabilidade do processo ECG.

Este fato pode explicar as diferenças dos aspectos superficiais obtidos no processo e registrado pelas fotos das figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

4.5 – Acabamento Superficial

O acabamento das superfícies usinadas por retificação superabrasiva e eletroquímica foram analisadas e medidas através da média aritmética (R_a) de rugosidade. Como mostra a figura 4.10, os resultados dos testes indicaram que a rugosidade das superfícies das amostras usinadas por ECG são consideravelmente inferiores às aquelas usinadas pelo processo de retificação superabrasiva.

Na usinagem por retificação com superabrasivos, em condições de retificação suave com granulação adequada do rebolo (item 2.3, página 18, 2º parágrafo), pode-se obter valores de R_a inferiores aos encontrados neste experimento. No entanto a operação utilizada neste trabalho não foi de acabamento e mesmo quando utilizado com a menor velocidade de avanço do rebolo ($V_f = 0,5$ mm/min), o tipo de operação empregada pode ser considerada “rigorosa” ou no mínimo “convencional” pela classificação de **Hahn e Lindsay (1984)**.

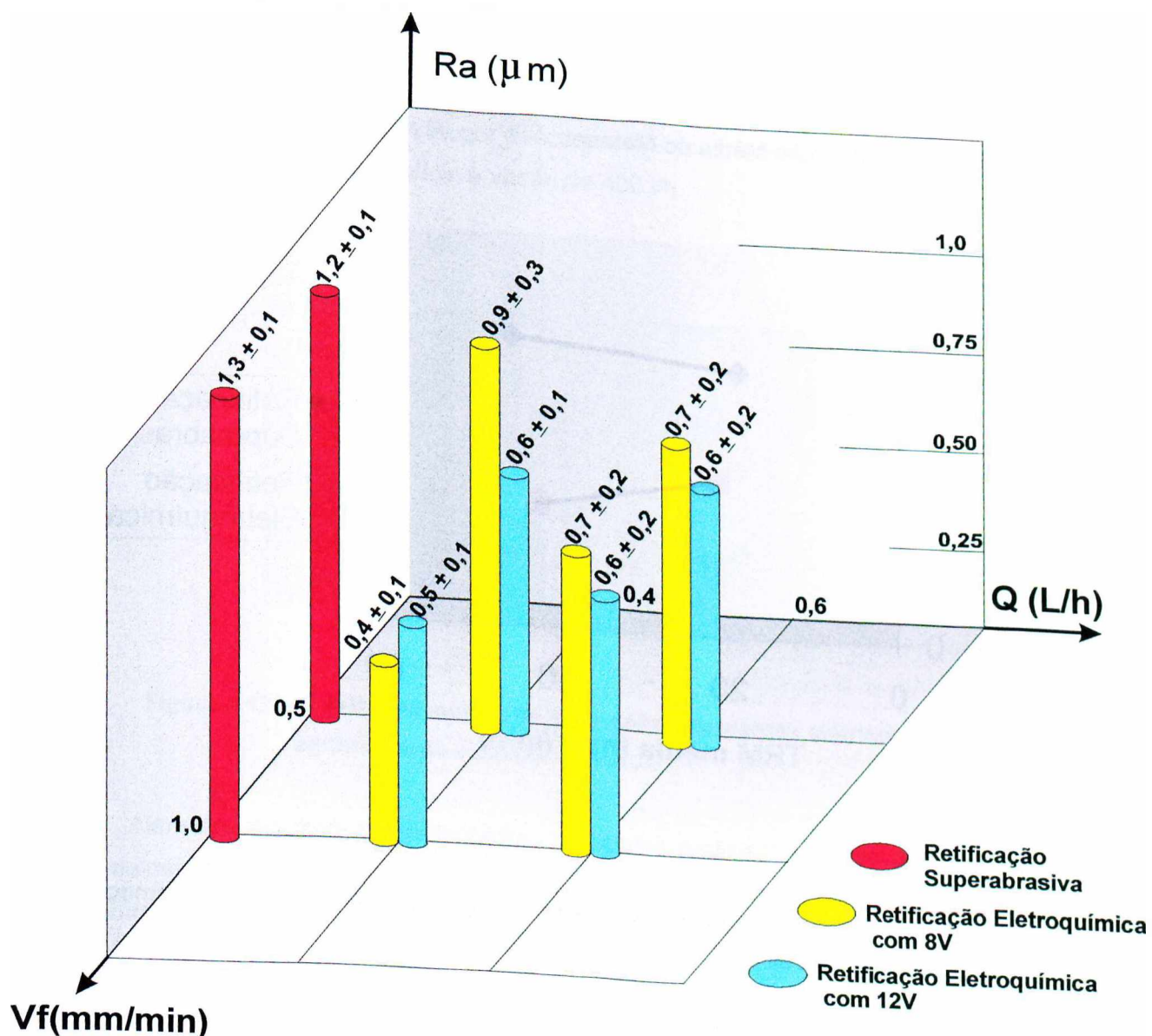


Figura 4.10 – Influência dos parâmetros de entrada (V_f , Q e U) na rugosidade Ra nos diferentes processos de retificação

Além disso, exceto os parâmetros relativos a vazão do líquido refrigerante e do fluido eletrolítico (tabela 3.1), todas as demais condições foram as mesmas para ambos processos. Desta forma, mesmo quando comparado com um processo de usinagem "não convencional de retificação" como a superabrasiva, a retificação eletroquímica se mostrou superior em relação a rugosidade da superfície usinada.

Na figura 4.11 tem-se a comprovação de um fato notável que conta muito a favor do processo de usinagem eletroquímica em que a ECG se baseia. Segundo **Pelizer (1997)**, é talvez o único processo em que o acabamento e a acuracidade da peça melhoram com o aumento da Taxa de Remoção Média do Material.

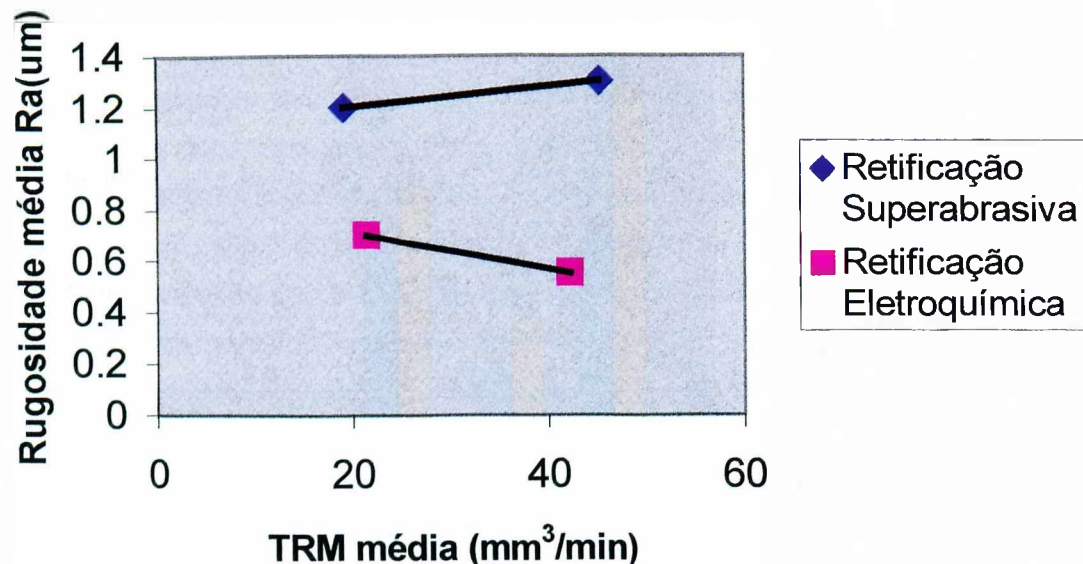


Figura 4.11 – Tendência da rugosidade superficial em relação média à taxa de remoção de material para os dois processos de retificação

Na retificação superabrasiva, como em todos os processos convencionais de usinagem, o acabamento superficial piora com o aumento da TRM. Na ECG. No entanto, quando se aumenta a TRM de, cerca de, 22 mm^3/min para cerca de 43 mm^3/min o valor de R_a caiu de 0,7 μm para, cerca de, 0,5 μm .

Pela figura 4.4 nota-se que de nada adianta aumentar a tensão da fonte pois isso não modifica, significativamente, a TRM. Além disso, o aumento de U pode provocar descargas entre o rebolo e a peça de trabalho como ocorreu com o uso de $U = 15$ volt que gerou o acabamento, como mostrado na figura 4.12.

Desta forma torna-se imprescindível determinar os valores críticos das variáveis independentes afim de evitar danos e acidentes no equipamento e conseguir as melhores condições de usinagem com total segurança. A figura 4.12 mostra detalhes da superfície da peça após sofrer processo de fusão por descargas elétricas, quando se aplicou uma tensão de 15 V, avanço do rebolo de 1 mm/min e vazão de 400 l/h.



Figura 4.12 – Detalhe da superfície após sofrer descargas elétricas em condições mais agressivas de usinagem por ECG

Além dos resultados apresentados, o trabalho realizado permitiu observar retificações eletroquímicas puderam ser realizadas em peças cilíndricas de pequenas dimensões ($\phi < 10\text{mm}$) para atender principalmente a pesquisas científicas.

4.6 - Dureza Superficial

Como se observa na coluna de dureza da tabela 4.1, não há diferenças apreciáveis desta propriedade no âmbito dos ensaios realizados. A maior diferença está em torno de 8,7%. Desta forma, no que diz respeito à ação das operações de usinagem, relativas à possíveis mudanças na característica de dureza superficial retificada, nada pode-se afirmar de sua ocorrência. Nota-se também que não há diferença apreciável entre os resultados de dureza superficial obtidos nos dois processos (860 ± 21 HV na retificação convencional superabrasiva e de 829 ± 38 HV na retificação eletroquímica). Observa-se também que tais resultados foram praticamente os mesmos obtidos em medições antes da usinagem (860 ± 25 HV). Isto era de se esperar pois mesmo num processo térmico como é no caso da retificação superabrasiva

não há possibilidade de aumento da dureza superficial em virtude das características iniciais do aço-rápido já endurecido. Desta forma os processos não mudam a dureza superficial do material.

Capítulo 5

Conclusões

O trabalho permitiu que fossem tiradas as seguintes conclusões:

- Com relação aos parâmetros analisados, pode-se concluir que:
 - (i) independentemente da variação da carga aplicada na fonte, a densidade de corrente permaneceu constante para o mesmo avanço;
 - (ii) o aumento da corrente elétrica se deve à redução da resistência no "gap", causada pela redução do próprio "gap" que, por sua vez, foi provocada pelo aumento do avanço do rebolo;
 - (iii) apesar de, aparentemente, não se ter observado relação da vazão do eletrólito com os outros parâmetros do processo, somente com o seu aumento acima de 400 l/h foi possível manter o processo de usinagem sem ocorrer fagulhas entre o rebolo e a peça de trabalho, possibilitando assim o aumento da tensão da fonte até a faixa de 12 V sem a ocorrência de descargas elétricas;
 - (iv) uma análise qualitativa por observação visual do posicionamento do fluxo do eletrólito, utilizando como critério a ocorrência ou não de fagulhas, mostrou a existência de considerável influência do ângulo (α) de direcionamento do fluxo e a distância do bico ejetor à superfície de trabalho do rebolo (τ) nas condições de operação de usinagem por ECG.

- Com relação à textura superficial, pode-se concluir que:
 - (i) para o tipo de operação e equipamento empregado, o aspecto eletroquímico é responsável pelas características da textura final da superfície usinada;
 - (ii) a usinagem por retificação convencional deixa marcas visíveis dos grãos abrasivos do rebolo, enquanto que na usinagem por ECG, mesmo em condições mais agressivas de avanço do rebolo, estas marcas não são visíveis, mesmo ao microscópio;

- (iii) a usinagem por ECG não deixa rebarbas e nem cantos vivos, enquanto que na usinagem por retificação convencional estes efeitos são perceptíveis;
 - (iv) as amostras obtidas pela usinagem ECG apresentam uma camada de aspecto escuro em função da oxidação, contudo, esta camada pode ser removida com facilidade, com escova de aço;
 - (v) em ambos processos de usinagem não se observou queima, que pode ser consequência da qualidade do rebolo superabrasivo que tem excelentes características de corte.
- A TRM específica média e a rugosidade média aritmética obtidas pelo processo ECG mostraram ser bastante satisfatórias, na faixa de $0,17 \text{ cm}^3/(\text{min} \cdot 100 \text{ A})$ e $0,62 \mu\text{m}$ respectivamente, quando comparadas com aquelas obtidas na literatura.
 - processo de usinagem por ECG mostrou ser altamente interessante, para substituir a retificação convencional superabrasiva.
 - O equipamento ECG descrito revelou-se efetivo, através do processo de usinagem por retificação eletroquímica do aço ABNT M6 de pequenas dimensões para a realização de pesquisas de laboratório onde o processo é descontínuo. Esta efetividade mostrou-se não somente no aspecto de remoção de material, mas também no baixo valor de R_a obtido.
 - Para o tipo de operação de retificação utilizado, o desempenho da retificadora eletroquímica transformada e empregada neste trabalho é potencialmente dependente das condições de avanço.

Algumas sugestões podem ser proposta para trabalhos futuros considerando que os resultados gerais obtidos na retificação eletroquímica do aço-rápido ABNT M6 mostraram-se coerentes com os preconizados pela literatura, em que pesem o fato de não serem conhecidos resultados específicos para o material em questão. Por exemplo, foram comprovados os melhores resultados esperados em termos de textura superficial e arredondamento de cantos. Foi constatado também que prevalece o mecanismo de remoção eletroquímica, em detrimento da remoção abrasiva. Foi observado que as pequenas e intermitentes faíscas só ocorriam esporadicamente, numa indicação clara que este mecanismo de remoção teve pequena

atuação global. A taxa de remoção do material não se alterou quando se compararam os processos de retificação superabrasiva e eletroquímica. Ambos são quase que exclusivamente influenciados pelo avanço do rebolo. No entanto, acredita-se que em um equipamento em que se pudesse dispor de um avanço maior, bem como um circuito eletrolítico que possibilitasse aumento na vazão do eletrólito, a retificação eletroquímica ECG superaria o processo superabrasivo, também neste aspecto de TRM.

Desta forma, algumas sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos para dar continuidade ao estudo da usinagem por retificação eletroquímica são descritas abaixo:

- Aperfeiçoamento da retificadora eletroquímica, através da melhoria dos recursos deste equipamento, tais como melhorar a fixação e movimentação do par ferramenta-peça, ampliar os valores das variáveis de entrada de usinagem tais como vazão do eletrólito (Q) e velocidade de avanço (V_f), automatizar os mecanismos de acionamento e operação, estabelecer um controle do avanço (V_f) com um *gap* monitorado.
- Realizar ensaios com maiores valores de velocidade de avanço e vazão do eletrólito.
- Realizar ensaios com ferramentas (rebolos) com formas variadas, para verificar a influência na forma geométrica.
- Realizar ensaios com diferentes combinações da taxa de fluxo e concentração do eletrólito para analisar suas influências no acabamento da superfície produzida.
- Através das variáveis passíveis de controle, encontrar o melhor balanceamento (condições ótimas) entre as ações mecânica e eletroquímica para possíveis melhoria e controle da TRM e acabamento superficial.

Capítulo 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENEDICT, G. F., 1987, *Nontraditional Manufacturing Processes, Electrochemical Grinding*, New York: Marcel Dekker, , PP – 153 – 164.**
- BHATTACHARYYA, S. K., FOWELL B., WALLBANK J., 1984, *Control of Workpiece Surface Quality in Grinding*, New Orleans: ASME, pag 425 – 435.**
- BRANDI, R.R., 1974, *Basics of eletrochemical grinding*, American Machinist Special Report No. 665, pag 45-50.**
- BRUINS, D.H., 1972, *Herramientas y Máquinas para la Mecanizations de la Acabado*, Ediciones Urmo, Traducido por Tomas Nieto Aguilera, Bilbao.**
- COLE, R. R., 1978, *An experimental investigation of the electrolytic grinding process*, J. Engg. For Industry, Trans. ASME, vol. 83, pp 194 – 201, aput **KUPPUSWAMY, G., VENKATESH, V.C. 1978, *Electrochemical Grinding With Magnetic Fielt*, Annals of the CIRP, Vol. 27/01/1978, pag 107.****
- CRUZ, C., 1995, *Há Inúmeras Maneiras Não-Tradicionais de Usinar Materiais. Conheça Algumas*, São Paulo, Revista Máquinas & Metais, pgs 80-85.**
- CRUZ, C., MALAQUIAS, E., FERNADES, L.A., 1999, *Introdução aos Processos Não Tradicionais de Usinagem*, Uberlândia: EDUFU, 47 p.**
- HAHN, R.S., LINDSAY, R.P., 1984, *The Influence of Process Variables on Metal Removal, Surface Integrity and Vibration in Grinding* , 10 th MTDR conf., 1969, p. 95 – 117. Apud **BHATTACHARYYA et al, *Control of Workpiece Surface Qauality in Grinding*, New Orleans: ASME, pag 107 – 111.****

KIM J.D., CHOI I.H., 1998, *Electrochemical Deburring System Using Eletroplated CBN Wheels*, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 38, No. 1-2, pp. 29-40.

KOZAK, J., OSMAN H.M., DABROWSKI, L., 1998, *Theoretical and Experimental Investigations for Profile Electrolytic Machining With Rotating Electrode*, Poland: Institute of Mechanical Technology, Technical University of Warsaw, pag 281 – 286.

KOZAK, J., OCZÓŚ, K. E., 1998, *Selected Problems of Abrasive Hybrid Machining*, International Conference on Advances In Production Engineering, Polish, vol II, pag 291 – 299.

KUPPUSWAMY, G., VENKATESH, V.C., 1978, *Electrochemical Grinding With Magnetic Field*, Annals of the CIRP, Vol. 27/01/1978. pag 107 – 111.

LINDSAY, R.P., 1989, *Principles of Grinding*, Metal's Handbook, Volume 16, Norton Company, pp- 421 - 427.

MACHINING DATA HANDBOOK, *Nontraditional Machining*, Nova Edição, Volume 2, 1980.

MALAQUIAS, E., 1996, *Contribuição para o Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento de Usinagem Eletroquímica*, Uberlândia: UFU, 79 p, (Dissertação de Mestrado).

MARTY, C., 1971, *Usinages Par Procédés Non Convencionnels*, Paris: Masson, pag 69 – 116.

McGEOUGH, J.A., 1988, *Advanced Methods of Machining*, London: Chapman and Hall, pag 153 –164.

MONTGOMERY, D.C., 1984, *Design and Analysis of Experiments*, 2º edição, John Wiley & Sons, New York, 536 p.

OLIVEIRA, J.F., PURQUEIRO, B.M., 1989, *Banco de Ensaios Assistido por Microcomputador para Pesquisa Sobre o Processo de Retificação*, X COBEM , Rio de Janeiro, RJ , pag 603 – 606.

PANDEY, P.C., SHAN, H.S., 1985, *Modern Machining Processes*, New Delhi: Tata McGraw Hill,

- PELIZER, M.C., 1997**, *Estudo da Influência do Ferramental na Acuracidade de Forma de Peças de Aço ABNT M2, obtidas por Usinagem Eletroquímica*, Uberlândia: UFU, 80 p, (Dissertação de Mestrado).
- PHILLIPS R. E., 1985**, *What Is Electrochemical Grinding and How Does It Work*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pag 65 – 70.
- RAMOS, C.A.D., SILVA NETO, J.C., CRUZ C., 1999**, *Transformação de uma Retificadora Eletroquímica (ECG) a Partir de uma Retificadora Cilíndrica Universal*, Uberlândia: UFU, 6º Colóquio de Usinagem, pag 121-137.
- RISKO, D.G., 1990**, *Electrochemical Machining – Innovative Solutions for Higher Productivity*, SME Technical Paper, MR90-244.
- ROWE, W.B., BLACK, S.C.E., MILLS, B., 1996**, *Temperature control in CBM grinding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Liverpool, England, pp 387.
- RUMYANTSEV, E., DAVYDOV, A., 1989**, *Eletrochemical Machining of Metals*, Moscow: Mir Publishers, pag 9 – 36.
- SILVA NETO, J. C., 1999**, *Desenvolvimento de uma Retificadora Eletroquímica a Partir de Uma Retifica Cilíndrica Universal*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 71 p.
- SNOEYS, R., DEKEYSER, W., STAELENS, F., 1988**, *Current Trends in Non-Conventional Material Processes*, CIRP Annals, Vol. 35/2.
- SORKHEL, S.K., BHATTACHARYYA, B., 1993**, *Parametric Control for Optimal Quality of the Workpiece in ECM*, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, pag 271 – 286.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Biblioteca

Anexo I

Resultados dos Ensaaios de Usinagem

Planilha de cálculo

		Condições de usinagem			Resultados																					
Unidade	→	Vf	U	Q	I		J		mi	mf	m	Δt	TRM		TRM / I		Ra *		Rq *		Dureza Vickers *					
		mm/min	V	x20l/h	A		A/cm²		g	g	g	min	mm³/min		(cm³/min)/100A		um		um		HV 10/30					
Ensaio	CP					média	D	média	D					média	D	máx/mín	média	D	média	D	média	D	média	D		
3	1				12					30,13	28,52	1,61	9,3	22,17		0,18										
	2	0,5	8	30	12,8	12,4	0,6	28	1,3	30,46	28,91	1,56	9,2	21,77	21,97	0,28	0,17	0,18	0,007	0,7	0,17	0,91	0,26	792	57	
	3				11,2					28,93	27,41	1,51	10,0	19,34		0,18										
4	4	0,5	8	20	14,4	12,8	2,3	28	5,1	27,69	26,13	1,56	9,7	20,63	19,98	0,91	0,13	0,16	0,025	0,93	0,27	1,21	0,36	815	33	
	5				11,2					30,28	28,66	1,63	9,7	21,59		0,19										
5	6	0,5	12	30	12,4	11,8	0,8	26	1,8	30,98	29,40	1,58	9,9	20,48	21,04	0,79	0,17	0,18	0,014	0,57	0,23	0,77	0,41	842	38	
	7				13,6					31,71	29,83	1,88	10,3	23,47		0,22										
6	8	0,5	12	20	10,8	12,2	2,0	27	4,4	30,36	28,71	1,65	9,8	21,50	22,49	1,39	0,16	0,19	0,030	0,55	0,14	0,71	0,2	844	41	
	9				26,4					31,38	29,61	1,77	5,3	42,73		0,16										
7	10	1	8	30	28,8	27,6	1,7	61	3,8	31,19	29,57	1,61	4,9	42,01	42,37	0,51	0,15	0,15	0,008	0,69	0,19	0,86	0,25	856	19	
	11				23,6					29,04	27,36	1,69	5,1	42,23		0,20										
8	12	1	8	20	28	25,8	3,1	57	6,9	27,80	25,93	1,87	5,1	47,27	44,75	3,56	0,15	0,18	0,025	0,41	0,08	0,52	0,1	867	16	
	13				25,6					29,72	28,07	1,65	4,9	43,49		0,17										
9	14	1	12	30	28	26,8	1,7	59	3,8	29,73	28,17	1,56	4,6	43,55	43,52	0,04	0,16	0,16	0,007	0,62	0,17	0,81	0,23	860	14	
	15				26					30,80	29,18	1,62	5,1	40,58		0,20										
10	16	1	12	20	20	23,0	4,2	51	9,3	29,25	27,77	1,48	5,3	35,90	38,24	3,30	0,14	0,17	0,032	0,47	0,06	0,62	0,1	858	52	
	17									26,69	25,41	1,28	9,8	16,69												
1	18	0,5		22,5						26,74	25,14	1,60	9,6	21,36	19,02	3,30				1,23	0,06	1,57	0,06	860	21	
	19									30,21	26,47	3,74	10,0	47,75												
2	20	1		22,5						30,40	26,63	3,77	9,9	48,75	48,25	0,71				1,33	0,1	1,66	0,14	860	19	
média Total															0,17											
Dp Total																0,025										

Ensaio = número do ensaio; CP = número do corpo de prova; Vf = velocidade de avanço do rebolo; U = tensão da fonte; Q = vazão do eletrólito;

I = intensidade de corrente; J = densidade de corrente; D = desvio máximo; mi = massa inicial; mf = massa final; Δt = variação do tempo;

TRM = taxa de remoção de material; Ra = média aritmética da área em módulo do perfil de rugosidade em relação à linha média; Rq = é o parâmetro rms correspondente do Ra; Hv10/30 = dureza vickers obtida num ensaio em que foi aplicado uma força de 10 kgf por 30 segundos; Eletrólito = solução aquosa de NaNO3; concentração do eletrólito = 300 g/l; velocidade de corte = 24 m/s; material do rebolo = CBN; rotação do rebolo = 1850 rpm; diâmetro do rebolo = 246,3 mm; peça de trabalho = bits redondo de aço rápido ABNT M6; composição: Co-12%; Cr-4,25; Mo-5%; W-6,2%; V-1,9%; C-0,9%; operação de retificação: cilíndrica de mergulho com a mesa parada. Nos ensaios de usinagem convencional, números 1 e 2, foi utilizado uma vazão de 450 l/h de fluido refrigerante.

Anexo II

Resultados da Medição de Rugosidade e Dureza Vickers

Planilha de resultados dos ensaios de rugosidade e dureza Vickers

Comprimento de amostragem igual ao comprimento de onda limite ("cut-off")
 $L_c = 0,8$ mm e percurso de medição $L_n = 2,4$ mm, mínimo permitido pela ISO 4288
 para R_a na faixa de 0.1 a 2 μ m.

A dureza Vickers foi obtida aplicando uma carga de 10 kgf por 30 segundos.

e	R_a	R_q	R_t	R_{sk}	R_{ku}	HV 10/30
n	0,68	0,86	5,23	-0,12	3,00	707
s	0,60	0,75	4,12	0,31	2,92	772
a	0,73	0,89	4,71	0,32	1,73	749
i	1,09	1,53	7,93	-1,17	4,11	752
o	0,64	0,90	6,48	1,58	7,23	858
	0,60	0,76	5,64	0,39	3,74	824
3	0,62	0,81	5,70	0,93	4,95	870
	0,60	0,77	5,42	0,66	4,10	803
Média	0,70	0,91	5,65	0,36	3,97	792
Desvio Padrão	0,17	0,26	1,16	0,80	1,64	57

e	0,73	0,94	7,13	0,41	4,41	824
n	0,82	1,05	7,22	0,36	3,56	752
s	0,81	1,03	8,03	0,25	3,70	798
a	0,83	1,06	6,93	0,51	3,67	798
i	1,48	1,88	10,60	0,29	3,12	824
o	0,99	1,29	6,98	0,85	3,66	852
	1,14	1,63	9,45	0,75	4,65	852
4	0,66	0,83	5,45	-0,28	3,53	824
Média	0,93	1,21	7,72	0,39	3,79	816
Desvio Padrão	0,27	0,36	1,62	0,34	0,50	33

e	0,50	0,62	3,54	0,17	2,72	795
n	0,45	0,57	3,49	0,32	3,24	795
s	0,39	0,49	3,19	-0,04	3,10	852
a	0,51	0,62	3,21	-0,05	2,49	824
i	1,10	1,75	11,70	-2,25	9,22	824
o	0,45	0,59	4,21	0,90	5,44	882
	0,53	0,70	4,56	0,50	3,84	882
5	0,67	0,84	5,46	0,19	3,60	882
Média	0,57	0,77	4,92	-0,03	4,21	842
Desvio Padrão	0,23	0,41	2,85	0,95	2,22	38

e	0,50	0,62	3,55	0,35	2,86	824
n	0,49	0,63	4,32	0,81	5,00	853
s	0,82	1,15	6,69	1,60	5,66	824
a	0,47	0,62	4,59	0,80	4,95	762
i	0,44	0,57	3,81	0,65	3,95	876
o	0,44	0,55	3,90	0,85	4,63	852
	0,58	0,73	3,69	-0,24	2,71	882
6	0,69	0,85	4,84	-0,32	2,49	882
Média	0,55	0,71	4,42	0,56	4,03	844
Desvio Padrão	0,14	0,20	1,02	0,63	1,21	41

e	0,62	0,73	3,63	0,35	2,42	852
n	0,48	0,62	2,95	-0,45	2,80	852
s	0,58	0,69	2,81	-0,18	2,27	824
a	0,53	0,65	3,20	-0,20	2,65	882
i	0,97	1,23	6,10	0,30	2,77	852
o	0,59	0,74	3,31	0,41	2,75	852
	0,89	1,11	5,95	0,63	3,84	882
7	0,89	1,13	5,06	0,38	2,80	852
Média	0,69	0,86	4,13	0,16	2,79	856
Desvio Padrão	0,19	0,25	1,36	0,38	0,47	19

e	0,51	0,65	4,24	0,57	3,70	882
n	0,50	0,67	4,95	0,74	5,14	882
s	0,40	0,53	4,12	0,50	4,68	852
a	0,47	0,59	4,44	0,62	4,27	852
i	0,38	0,49	2,81	-0,66	3,48	882
o	0,38	0,46	2,46	0,28	2,74	882
	0,31	0,39	2,07	-0,06	2,68	852
8	0,33	0,42	2,25	-0,34	3,01	852
Média	0,41	0,52	3,42	0,20	3,71	867
Desvio Padrão	0,08	0,10	1,14	0,51	0,91	16

e	0,90	1,20	6,41	0,44	3,45	852
n	0,62	0,75	3,96	0,10	2,43	882
s	0,64	0,79	4,13	0,23	2,55	882
a	0,86	1,13	5,79	-1,00	4,37	852
i	0,49	0,69	4,83	1,78	3,20	852
o	0,45	0,58	3,51	0,40	3,60	852
	0,52	0,69	4,81	-0,02	4,29	852
9	0,49	0,66	4,75	-0,27	4,04	852
Média	0,62	0,81	4,77	0,21	3,49	860
Desvio Padrão	0,17	0,23	0,96	0,78	0,74	14

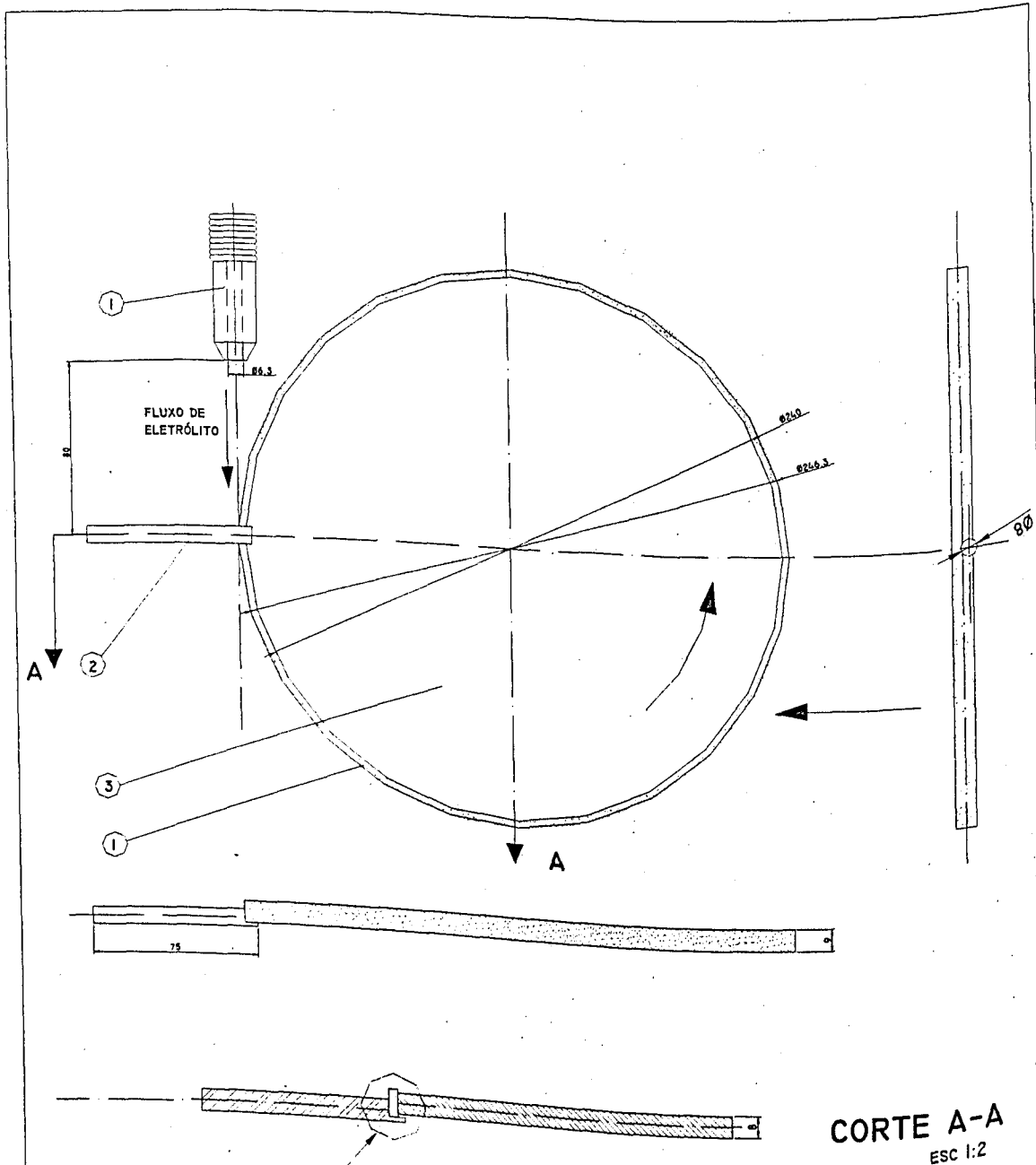
e	0,43	0,56	3,62	0,30	3,98	824
n	0,40	0,53	4,93	0,56	6,50	772
s	0,48	0,63	4,56	0,58	4,11	852
a	0,48	0,63	4,29	-0,15	3,63	914
i	0,42	0,52	2,89	0,35	2,92	914
o	0,59	0,83	5,12	-0,89	4,74	852
	0,52	0,68	4,63	-0,19	3,55	914
10	0,43	0,57	3,66	0,22	3,75	824
Média	0,47	0,62	4,21	0,10	4,15	858
Desvio Padrão	0,06	0,10	0,76	0,49	1,08	52

e	1,23	1,57	9,59	0,27	3,38	882
n	1,21	1,54	9,46	0,20	3,25	852
s	1,18	1,58	8,71	0,22	3,52	882
a	1,19	1,56	8,76	0,38	3,42	882
i	1,17	1,47	8,84	0,00	3,22	852
o	1,26	1,56	7,42	-0,06	2,69	852
	1,29	1,65	8,01	0,13	2,79	852
1	1,34	1,65	8,02	0,14	2,68	824
Média	1,23	1,57	8,60	0,16	3,12	860
Desvio Padrão	0,06	0,06	0,75	0,14	0,34	21

e	1,30	1,71	9,74	0,27	3,30	852
n	1,33	1,72	9,54	0,34	3,07	852
s	1,40	1,70	9,15	0,65	2,91	852
a	1,33	1,72	9,54	0,34	3,07	824
i	1,20	1,46	7,34	0,19	2,45	882
o	1,21	1,47	7,31	0,40	2,60	873
	1,31	1,63	8,74	0,39	2,84	873
2	1,52	1,89	9,19	0,62	2,97	873
Média	1,33	1,66	8,82	0,40	2,90	860
Desvio Padrão	0,10	0,14	0,97	0,16	0,27	19

Anexo III

Montagem Para os Ensaio de Retificação



CORTE A-A
ESC 1:2

4	1	CAMADA ABRASIVA EXTERNA DO REBOLO	CBN
3	1	ALMA METÁLICA DO REBOLO	AÇO ABNT 1030
2	1	BITS REDONDO Ø 8x25 MM	AÇO ABNT M2
1	1	BICO FLEXÍVEL DE INJEÇÃO DE ELETRÓLITO	AÇO ABNT 1020
POS	QT	DENOMINAÇÃO	MATERIAL
UFU		UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	UÑT
ESCALA		ORIENTADO: ENG. CARLOS A. D. RAMOS	
1:2,5		ORIENTADOR: PROF. DR. CLAUDIONOR CRUZ	
UNIDADE		MONTAGEM PARA OS	
MM		ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO	
		NÚMERO 01	
		VISTO:	