

MON  
6219  
3586  
TES/ME

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

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO**  
**DE UM EQUIPAMENTO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

**EVALDO MALAQUIAS DA SILVA**

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

**DIRBI - UFU** MON 00308/97



1000175496

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Claudionor Cruz - (UFU) - Orientador

Prof. Dr. Lourival Boehs - (UFSC)

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão - (UFU)

Uberlândia, 25 de julho de 1996.

**Aos meus pais Vera Lúcia e Geraldo,  
minha irmã Giane,  
minha namorada Thaís,  
meus tios José Maria e Valda,  
minhas primas Débora e Mônica,  
minha afilhada Mariana.**

## 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.
- Aos professores do curso de Pós-Graduação pelos conhecimentos transmitidos.
- Aos técnicos da Oficina Mecânica pela ajuda prestada no decorrer do trabalho.
- Aos companheiros André Beloni, Carlos José, Maurício pela colaboração e amizade.
- A todos companheiros do curso pelo apoio.
- À CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro.
- A todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UM  
EQUIPAMENTO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA**

**SUMÁRIO**

	<b>Página</b>
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - FUNDAMENTOS DA USINAGEM ELETROQUÍMICA	5
2.1. Taxa de Remoção de Material (TRM)	8
2.2. Acuracidade	15
2.3. Integridade Superficial	20
3 - BASES CONCEITUAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA	22
3.1. Fonte de Corrente	23
3.2. Unidade Eletrolítica	24
3.3. Unidade Mecânica	28
4 - DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA	36
4.1. Projeto e Construção da Cuba Eletrolítica	40
4.2. Desenvolvimento do Sistema de Filtragem	44
4.3. Desenvolvimento do Circuito Eletrolítico	52
4.4. Desenvolvimento do Mecanismo de Avanço	54

5 - ENSAIOS DE USINAGEM E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
5.1. Rebarbação	62
5.2. Furação Eletroquímica	66
6 - CONCLUSÕES	74
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

**MALAQUIAS, E.;** *Contribuição para o Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento de Usinagem Eletroquímica*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia -MG, 1996, 79 pgs.

**Resumo:** A usinagem eletroquímica é um dos mais promissores processos não tradicionais de usinagem. Este processo é muito utilizado nas indústrias automotivas, naval e principalmente na indústria aeroespacial. Atualmente, poucos fabricantes mundiais dominam a tecnologia de projeto e fabricação de equipamentos de usinagem eletroquímica. Assim sendo, o objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um protótipo para ser utilizado em pesquisas. Antes de entrar na abordagem do projeto em si, foi feita uma exposição dos fundamentos da usinagem eletroquímica de forma dirigida aos parâmetros necessários para o projeto do protótipo. Após a descrição dos detalhes de projeto e construção do protótipo, foi o mesmo utilizado para a furação de aço rápido e rebarbação de anéis de aço SC 3428 (DIN 1629). Os furos foram analisados não só em termos de remoção de material mas também em termos de acuracidade nos aspectos de sobre-corte lateral e conicidade. Na rebarbação foi analisado o tempo de usinagem e a qualidade visual da superfície rebarbada. O trabalho compara os resultados obtidos com os relatados pela literatura e apresenta as possíveis causas para as discrepâncias encontradas.

**Palavras-chave:** usinagem eletroquímica, protótipo, acuracidade e rebarbação.

## ABSTRACT

MALAQUIAS, E.; *Contribution to the Development of a Electrochemical Machine Prototype*, MSc Thesis, UFU, Uberlândia - MG, 1996.

Electrochemical Machining is one of the most promising non traditional machining processes. It has been applied in automotive and aerospace industries. Nowadays, only a few manufacturer worldwide possess the technology for the manufacturing of electrochemical equipment. This being the case, the present work aims to the develop a prototype to be used in research. Prior to the project specification, it is presented an explanation on the nature of the electrochemical process. After detailing the project and building the prototype, the machine was tested for drilling high speed steel and deburring rings of SC 3428 (DIN 1629) steel. The holes were analysed considering not only the remove material rate but also the overcut and taper accuracy. With regard to deburring, it was analysed the machining time and the visual quality of the surface. Additionally, the findings are related to those presented in the literature and possible reasons for the differences found are discussed.

Keywords: electrochemical machining, prototype, overcut, taper and deburring

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 - Produção de corrente elétrica por eletrólise.	5
2.2 - Representação esquemática de uma cuba eletrolítica de uma unidade de usinagem eletroquímica.	6
2.3 - Esquema ilustrativo do circuito elétrico de um equipamento de usinagem eletroquímica.	12
2.4 - Vista esquemática de uma chapa de aço furada pelo processo eletroquímico (Andrade, 1993).	17
2.5 - Gráfico que apresenta as curvas características de eficiência de corrente por densidade de corrente de uma solução de NaCl e de uma solução de NaNO <sub>3</sub> (McGeough, 1988).	18
2.6 - Furação de peças utilizando os seguintes eletrólitos (McGeough, 1988): (a) Solução de Nitrato de Sódio; (b) Solução de Cloreto de Sódio.	19
3.1 - Esquema de um equipamento de usinagem eletroquímica.	22
3.2 - Esquema simplificado do mecanismo de avanço da ferramenta	29
3.3 - Esquema que simboliza o avanço da ferramenta em uma operação de usinagem eletroquímica.	30
3.4 - Gráfico da variação do <i>gap</i> com o tempo quando não há avanço da ferramenta.	31



3.5 - Gráfico da variação do <i>gap</i> com o tempo quando a velocidade de avanço da ferramenta for constante.	32
4.1 - Vista geral do protótipo de usinagem eletroquímica ao término da primeira etapa.	37
4.2 - Vista geral do protótipo de usinagem eletroquímica ao término da segunda etapa.	37
4.3 - Vista geral do protótipo de usinagem eletroquímica ao término da terceira etapa.	38
4.4 - Vista da fonte de corrente utilizada no protótipo de usinagem eletroquímica	39
4.5 - Plataforma de fixação da cuba eletrolítica.	41
4.6 - Grampo a ser utilizado na fixação das peças.	42
4.7 - Mesa de coordenadas e sistema de fixação da cuba eletrolítica.	43
4.8 - Vista geral da cuba eletrolítica utilizada no protótipo.	43
4.9 - Perspectiva de um hidrociclone mostrando esquematicamente o vórtice formado em seu interior.	47
4.10 - Esquema de um hidrociclone para a geometria de Rietema.	49
4.11 - Vista do hidrociclone com suas dimensões internas.	51
4.12 - Esquema do circuito eletrolítico.	52
4.13 - Fole de vedação da cuba eletrolítica.	54

4.14 - Vista geral do mecanismo de avanço do cabeçote porta-ferramenta com denominação das peças.	55
4.15 - Vista do redutor que transmite o movimento do motor para o fuso de esferas recirculantes.	56
4.16 - Foto parcial do mecanismo de avanço do protótipo.	57
5.1 - Esquema da parte elétrica do protótipo.	60
5.2 - Ferramentas utilizadas nos testes preliminares realizados no protótipo de usinagem eletroquímica.	61
5.3 - Anéis de aço galvanizado utilizados nos ensaios de rebarbação.	62
5.4 - Esquema ilustrativo do ensaio de rebarbação.	63
5.5 - Ferramenta utilizada nos ensaios de rebarbação.	63
5.6 - Anéis de aço após a rebarbação.	66
5.7 - Ferramentas utilizadas nos ensaios de furação.	66
5.8 - Vistas da barra de aço rápido utilizada nos ensaios de furação.	68
5.9 - Vista esquemática da barra de aço rápido após a furação.	68
5.10 - Foto da barra de aço rápido após a usinagem.	71

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
2.1 - Taxa de remoção de material teórica para uma intensidade de corrente de 1 000 A (McGeough, 1988).	11
3.1 - Materiais para ferramentas de usinagem eletroquímica (Benedict, 1987).	34
3.2 - Parâmetros de usinagem eletroquímica.	35
4.1 - Resultados do peneiramento.	46
4.2 - Parâmetros de serviço de um hidrociclone individual (Svarovsky, 1984).	47
4.3 - Constantes para a geometria de Rietema (Svarovsky, 1984).	49
4.4 - Valores utilizados no projeto do hidrociclone.	51
5.1 - Resultados dos ensaios de rebarbação.	65
5.2 - Resultados dos ensaios de furação.	70

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Peso atômico do metal da peça (g/mol).
- c - Calor específico do eletrólito (J/g °C).
- $c_f$  - Coeficiente de atrito.
- $d_h$  - Diâmetro hidráulico médio do canal pelo qual passa o eletrólito (mm).
- E - Equivalente eletroquímico (g/mol C).
- F - Constante de Faraday (96 500 C).
- h - Valor do *gap* (mm).
- I - Corrente elétrica (A).
- J - Densidade de corrente elétrica (A/cm<sup>2</sup>).
- k - Condutividade do eletrólito (ohm<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>).
- M - Qualquer metal utilizado em usinagem eletroquímica.
- p - Pressão do eletrólito (kfg/cm<sup>2</sup>).
- Re - Número de Reynolds.
- $R_g$  - Resistência do *gap* (ohm).
- $R_T$  - Resistência total do circuito elétrico (ohm).
- S - Área da projeção ortogonal da ferramenta (cm<sup>2</sup>).
- TRM - Taxa de remoção de material (mm<sup>3</sup>/min).
- V - Diferença de potencial (Volts).
- v - Velocidade do eletrólito (m/s).
- $v_a$  - Velocidade de avanço do cabeçote porta-ferramenta (mm/min).
- $\bar{v}$  - Velocidade média do eletrólito (m/s).

- $z$  - Valência do metal.
- $\Delta m$  - Massa de material usinado (g).
- $\Delta t$  - Tempo de usinagem (s).
- $\Delta V$  - Volume de material usinado ( $\text{mm}^3$ ).
- $\mu$  - Viscosidade absoluta do eletrólito (cP).
- $\rho$  - Densidade do metal ( $\text{kg/m}^3$ ).

## 1 - INTRODUÇÃO

Conforme **Snoeys** (1986), os chamados processos não-tradicionais de usinagem, alguns de concepção bastante antiga, sofreram um espantoso desenvolvimento nas últimas décadas e tudo indica que crescerão ainda mais no presente e no futuro. **Cruz** (1995), afirma que na última década o desenvolvimento desses processos superou as expectativas de **Snoeys** e aponta as razões para tal crescimento, entre os quais: o emprego de novos materiais, a utilização de formas cada vez mais complexas, a exigência crescente de peças mais confiáveis, a miniaturização de componentes e a automatização.

De todos os processos não tradicionais, a Usinagem Eletroquímica (ECM - ElectroChemical Machining) é, sem dúvida, um dos mais promissores. A tecnologia eletroquímica em si, aplicada à usinagem, tem aproximadamente 20 anos, embora sua primeira patente, requerida por **Gussef**, date de 1929. Ainda na década de 50, este processo voltou a ser investigado como método de se usinar materiais de alta resistência e ligas resistentes ao calor, que apareceram após a 2ª Guerra. A partir de 1980, a Usinagem Eletroquímica experimentou um novo avanço, e hoje vem ocupando lugar de destaque na indústria automotiva, naval, de materiais médicos e principalmente na indústria aeroespacial.

A Usinagem Eletroquímica e todos os processos híbridos dela derivados, enquadram-se dentro desses processos que mais atraem os pesquisadores e a indústria interessada em usinar materiais condutores de eletricidade, de alta dureza, com alta exigência em termos de integridade superficial conforme está em **Field e Kahles** (1982) e **Rumyantsev e Davydov** (1989).

Apenas como exemplo, cita-se a fabricação de palhetas de turbinas em ligas de níquel e titânio. Esses componentes requerem alto desempenho dinâmico e resistência à fadiga, uma vez que transmitem grandes esforços em altas rotações, chegando, em alguns casos, a 20.000rpm. Tal usinagem só é possível por um processo praticamente insensível à dureza do material e por um processo que produz peças com excelente integridade superficial, que são os aspectos mais positivos da Usinagem Eletroquímica. O que confere estas características ao processo é que, neste, o arrancamento de material da peça se dá átomo por átomo através de um processo eletroquímico, que só depende das características eletroquímicas do material e também por não ocorrer geração de calor significativa, minimizando assim os problemas com trincas de concentração de tensão.

É natural que um processo que oferece tantas vantagens seja tão procurado, especialmente pelas indústrias de ponta que trabalham com materiais nobres e que normalmente oferecem as maiores dificuldades de usinagem. No entanto, há muito a evoluir para que o processo seja acessível para maior número de usuários e conseqüentemente muita pesquisa básica e de aplicação deve ser feita sobre o processo. Um dos maiores problemas é o custo do equipamento que varia de US\$ 200 000 para pequenas unidades até US\$ 1 500 000 para as unidades mais complexas. Poucos fabricantes mundiais dominam a tecnologia de projeto e fabricação de tais equipamentos. Citam-se, no mundo ocidental, apenas dois grandes fabricantes: a Anocut (americana) e a AEG (alemã). Sabe-se que russos e poloneses também dominam a tecnologia com custos um pouco menores que similares equipamentos ocidentais. É bastante fácil de entender que pesquisar sobre o processo já começa com um grande obstáculo: utilização de um equipamento para ensaios que ofereça as condições mínimas de desempenho e confiabilidade. Na realidade, os equipamentos disponíveis nas indústrias são

equipamentos fabricados para atender a uma necessidade específica e dificilmente um equipamento deste porte serviria à pesquisa, por não incorporar instrumentação e medição de variáveis que uma unidade de pesquisa necessita.

Em função do acima exposto, deu-se início em 1990 no Departamento de Engenharia Mecânica o projeto “Desenvolvimento de uma Unidade de Usinagem Eletroquímica”, do qual esta dissertação de mestrado é parte integrante, entre tantos outros trabalhos publicados e relatório de bolsistas enviados ao CNPq.

Este trabalho diz respeito à terceira etapa de desenvolvimento deste projeto no qual, além do autor, atuou também o aluno de iniciação científica Luis Felipe Mariani Jr, que contribuiu especialmente na realização dos ensaios experimentais de usinagem com o protótipo. Os objetivos a serem atingidos nesta etapa, são: desenvolvimento do circuito eletrolítico, projeto e construção do mecanismo de avanço do cabeçote porta-ferramenta e desenvolvimento do sistema de filtragem.

O escopo deste trabalho traz nos seus capítulos iniciais (segundo e terceiro) os fundamentos da Usinagem Eletroquímica, e nos seus capítulos finais (quarto, quinto e sexto) um resumo dos resultados mais importantes conseguidos na fase experimental.

Mais especificamente, o capítulo 2 traz os Fundamentos da Usinagem Eletroquímica, com dois objetivos: fazer uma exposição simples do processo em bases estritamente conceituais para servir de texto básico para iniciantes e estudantes de graduação e introduzir o leitor no contexto deste trabalho para que o mesmo possa, rapidamente, se familiarizar com a terminologia nele utilizada.

O capítulo 3 se preocupa com a apresentação do Equipamento de Usinagem Eletroquímica na forma apresentada nos textos clássicos sobre Processos Não-Tradicionais de



Usinagem. Além de procurar atingir objetivos similares aos do capítulo 2, este capítulo procura deixar claro que todo o protótipo foi construído a partir de esquemas e informações contidas em textos teóricos e acadêmicos, pois, conforme já foi observado, poucas empresas detêm conhecimentos específicos sobre o equipamento de usinagem eletroquímica. Como consequência, pouco interesse tem esses fabricantes de divulgar detalhadamente os projetos de seus produtos comerciais.

O capítulo 4 trata, essencialmente, das principais contribuições obtidas na fase de projeto e construção do protótipo, cumprindo, talvez, a principal missão do trabalho. Este capítulo também apresenta os desenhos de alguns componentes do protótipo. Para maiores detalhes sobre o projeto destes componentes, encontram-se nos arquivos do Laboratório de Usinagem Não-Tradicional os desenhos detalhados, tanto do conjunto como dos componentes separadamente.

O capítulo 5 apresenta os resultados conseguidos com a utilização do protótipo, com o objetivo de verificar se o equipamento construído apresenta desempenhos compatíveis com os da literatura. Além dos resultados, apresenta-se também, no capítulo 5, uma análise dos mesmos acompanhada de breves discussões.

O capítulo final, como de praxe, relata as principais conclusões. Além destas, traz também uma lista de sugestões para trabalhos futuros, pois, para que seja atingido o nível de protótipos industriais, ou de protótipos para pesquisa, outros melhoramentos deverão ainda ser introduzidos no estágio em que ora se encontra.

## 2 - FUNDAMENTOS DA USINAGEM ELETROQUÍMICA

A usinagem eletroquímica é um processo que tem como base a eletrólise. Conforme é bem conhecido, eletrólise é o processo pelo qual se pode gerar corrente elétrica entre dois condutores mergulhados em uma solução líquida. A corrente elétrica é gerada através da dissociação dos componentes da solução, especialmente escolhida para tal. Como exemplo, pode-se usar a solução de NaCl em água, a salmoura comum, conforme ilustrado na Figura 2.1. Neste caso, o sal e a água se dissociam formando os íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$  (de acordo com as Equações 2.1 e 2.2), com a conseqüente liberação de elétrons que geram a corrente elétrica mencionada.

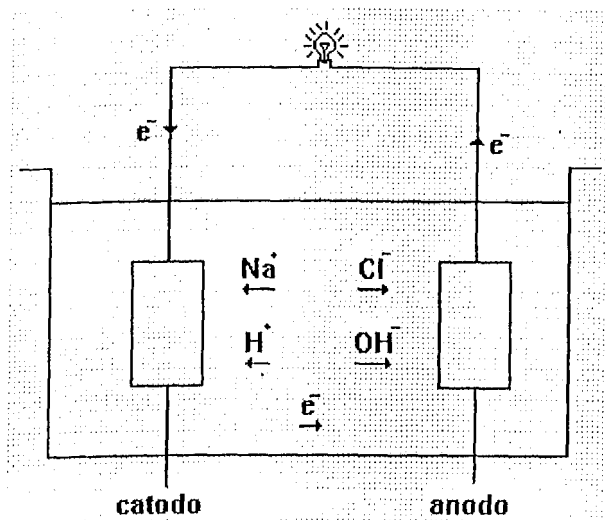


Figura 2.1: Produção de corrente elétrica por eletrólise.

Na usinagem eletroquímica, a dissociação eletrolítica não é usada para produzir corrente, e sim para arrancar material de um dos condutores mergulhados na solução, geralmente o anodo. Neste processo, utiliza-se uma fonte de energia de alta potência para fornecer uma corrente de alta intensidade, onde o pólo positivo é ligado na peça (anodo), e o pólo negativo é ligado na ferramenta (catodo). Esta fonte fornece corrente fazendo com que a dissociação dos íons ocorra com maior intensidade, arrancando mais material da peça, quanto maior for a fonte. Como esse arrancamento de material pode ser controlado, pode-se usar este fenômeno para a usinagem (Figura 2.2).

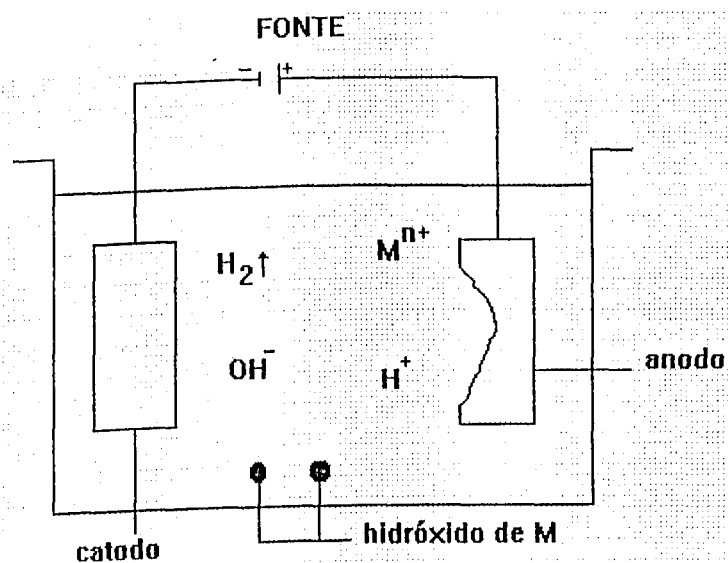


Figura 2.2: Representação esquemática de uma cuba eletrolítica de uma unidade de usinagem eletroquímica.

Devido ao fato de estar passando corrente entre dois pólos onde existe uma diferença de potencial entre eles, muitas reações podem ocorrer no catodo e no anodo, dependendo dos materiais da peça e dos eletrodos. Como se sabe, da eletroquímica básica, os íons positivos

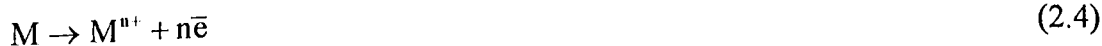
encaminham-se para o pólo negativo (catodo) e os íons negativos para o pólo positivo (anodo). Esses íons dependem da solução eletrolítica utilizada.

No caso da salmoura comum ( $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ ), conforme dito acima, os íons produzidos são  $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{OH}^-$  (Equações 2.1 e 2.2). No catodo, onde se tem o eletrodo ferramenta, o íon  $\text{H}^+$  recebe elétrons gerando o gás  $\text{H}_2$  (Equação 2.3). No anodo se encontra a peça metálica composta por um metal  $\text{M}$  qualquer, sendo que este metal, genericamente, cede  $n$  elétrons tornando-se um íon positivo (Equação 2.4). Este íon positivo irá reagir com o cátion mais eletronegativo presente, que neste caso é o  $\text{OH}^-$ , pois este é mais eletronegativo que o íon  $\text{Cl}^-$  (Equação 2.5).

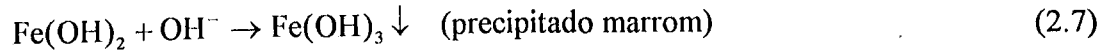
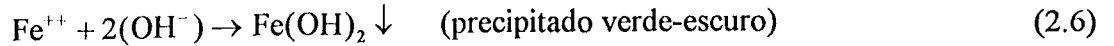
#### Reações Catódicas:



#### Reações Anódicas:



As reações eletroquímicas para o caso das ligas ferrosas (ferros e aços em geral), que são os materiais mais comumente utilizados, apresentam o ferro perdendo 2 ou 3 elétrons da sua última camada orbital, e sendo assim, as equações anódicas são as apresentadas nas Equações 2.6 e 2.7.



Das equações acima, resultam a formação de gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e dos precipitados de hidróxidos de ferro;  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  e  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Esses precipitados permanecem no eletrólito, que deve ser submetido a um processo de limpeza. No caso do gás hidrogênio, este deve ser exaurido do ambiente de usinagem para não causar danos (como explosão, por exemplo).

### 2.1. Taxa de Remoção de Material (TRM)

Na usinagem eletroquímica, um dos parâmetros mais importante é o volume de material da peça que é erodido pelo tempo (Expressão 2.8), conhecida como **taxa de remoção de material (TRM)**.

$$\text{TRM} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.8)$$

onde:

$\Delta V$  é a variação de volume do peça;

$\Delta t$  é o tempo de usinagem.

Sendo  $\Delta V$  o volume de material erodido no tempo  $\Delta t$ , e  $\Delta m$  sua massa, tem-se a

Expressão 2.9:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (2.9)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do material.

O cálculo de  $\Delta m$  vem das leis de Faraday que está sintetizada na Expressão 2.10.

$$\Delta m = E \cdot I \cdot \Delta t \quad (2.10)$$

onde:

$\Delta m$  é a massa de metal usinado;

$I$  é a intensidade de corrente elétrica;

$E$  é o Equivalente Eletroquímico dado por  $\frac{A}{z \cdot F}$ , em que:

$A$  é o peso atômico do material da peça;

$z$  é a valência do metal;

$F$  é a constante de Faraday (= 96.500 Coulomb );

Combinando-se as Expressões 2.9 e 2.10, chega-se à Expressão (2.11) para o cálculo da taxa de remoção de material.

$$TRM = \frac{E \cdot I}{\rho} \quad (2.11)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (2.9)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do material.

O cálculo de  $\Delta m$  vem das leis de Faraday que está sintetizada na Expressão 2.10.

$$\Delta m = E \cdot I \cdot \Delta t \quad (2.10)$$

onde:

$\Delta m$  é a massa de metal usinado;

$I$  é a intensidade de corrente elétrica;

$E$  é o Equivalente Eletroquímico dado por  $\frac{A}{z \cdot F}$ , em que:

$A$  é o peso atômico do material da peça;

$z$  é a valência do metal;

$F$  é a constante de Faraday (= 96.500 Coulomb );

Combinando-se as Expressões 2.9 e 2.10, chega-se à Expressão (2.11) para o cálculo da taxa de remoção de material.

$$TRM = \frac{E \cdot I}{\rho} \quad (2.11)$$

A Expressão 2.11 vem demonstrar o que já foi dito no capítulo 1, que a taxa de remoção de material depende exclusivamente das características eletroquímicas do material e da intensidade de corrente elétrica que passa através da interface ferramenta-peça, independentemente das características físicas usuais que influenciam decisivamente na usinagem tradicional, a saber: dureza, tenacidade, ductilidade, fragilidade, etc.

A Expressão 2.11 mostra que a taxa de remoção de material por unidade de corrente ( $TRM / I$ ) só depende das características do material, pois  $TRM / I = E/\rho$ . Os valores de  $E$  e  $\rho$  são encontrados facilmente, por exemplo **Feltre** (1994). Assim sendo, a taxa de remoção de material para os principais metais pode ser tabelada como na Tabela 2.1.



Tabela 2.1: Taxa de remoção de material teórica para uma intensidade de corrente de 1000A  
(McGeough, 1988).

METAL	PESO ATÔMICO (g / mol)	VALÊNCIA	DENSIDADE (g / cm <sup>3</sup> )	TRM (cm <sup>3</sup> / min)
ALUMÍNIO	26,97	3	2,67	2,10
BERÍLIO	9,00	2	1,85	1,50
CROMO	51,99	2	7,19	2,28
CROMO	51,99	3	7,19	1,50
CROMO	51,99	6	7,19	0,78
COBALTO	58,93	2	8,85	2,10
COBALTO	58,93	3	8,85	1,38
COBRE	63,57	1	8,96	4,44
COBRE	63,57	2	8,96	2,22
ESTANHO	118,69	2	7,30	5,04
ESTANHO	118,69	4	7,30	2,52
FERRO	55,85	2	7,86	2,22
FERRO	55,85	3	7,86	1,50
MAGNÉSIO	24,31	2	1,74	4,32
MANGANÊS	54,94	2	7,43	2,28
MANGANÊS	54,94	4	7,43	1,14
MANGANÊS	54,94	6	7,43	0,78
MANGANÊS	54,94	7	7,43	0,66
NIÓBIO	92,91	3	8,57	2,04
NIÓBIO	92,91	4	8,57	1,38
NIÓBIO	92,91	5	8,57	1,20
NÍQUEL	58,71	2	8,90	2,04
NÍQUEL	58,71	3	8,90	1,38
SILÍCIO	28,09	4	2,33	1,86
TITÂNIO	47,90	3	4,51	2,22
TITÂNIO	47,90	4	4,51	1,68
TUNGSTÊNIO	183,85	6	1,93	0,96
TUNGSTÊNIO	183,85	8	1,93	0,72
URÂNIO	238,03	4	1,91	1,92
URÂNIO	238,03	6	1,91	1,32
ZINCO	65,37	2	7,13	2,88

A intensidade de corrente dependerá da resistência total do circuito elétrico interligando a fonte, a ferramenta e a peça. Imaginando-se este circuito como o representado pelo modelo da Figura 2.3, tem-se, de acordo com a lei de Ohm, a intensidade de corrente dada por:

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_1 + R_2 + \dots + R_g} \quad (2.12)$$

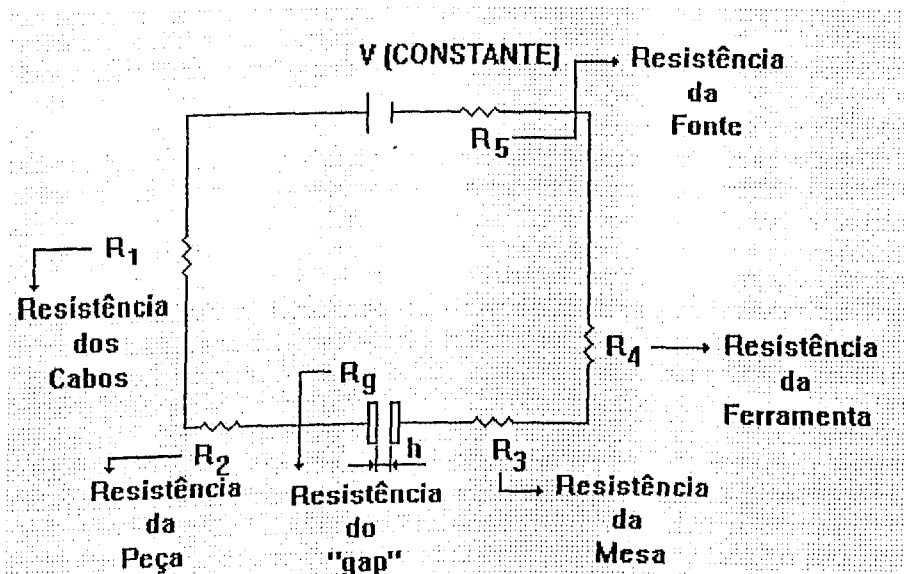


Figura 2.3: Esquema ilustrativo do circuito elétrico de uma unidade de usinagem eletroquímica.

Da Expressão 2.12 têm-se que a corrente é função da tensão (característica do equipamento, no caso constante) e da resistência elétrica do circuito. Entretanto, todas as resistências ( $R_1$  .....  $R_5$ ) tornam-se desprezíveis face ao valor da resistência do *gap*, que é a distância entre a ferramenta e a peça. Assim, a resistência do *gap* é a variável mais importante,

pois depende dos componentes do eletrólito e do tamanho do *gap* propriamente dito. Das considerações acima, resulta a Expressão 2.13.

$$I \cong \frac{V}{R_g} \quad (2.13)$$

A Expressão 2.14 apresenta o cálculo da resistência elétrica do *gap*, de acordo com a lei de Ohm.

$$R_g = \frac{h \cdot r}{S} \quad (2.14)$$

Onde:

$h$  é a distância entre ferramenta-peça (*gap*);

$r$  é a resistividade do eletrólito;

$S$  é a área da projeção ortogonal da face da ferramenta.

Das Expressões 2.13 e 2.14, resulta a Expressão 2.15.

$$I = \frac{V \cdot S}{h \cdot r} \quad (2.15)$$

Para que a intensidade de corrente ( $I$ ) seja máxima, deve-se maximizar a tensão ( $V$ ) e a área ( $S$ ), e minimizar o *gap* ( $h$ ) e a resistividade do eletrólito ( $r$ ). No entanto, considerando que a tensão é constante e necessariamente baixa (5-25 Volts) para que não ocorra abertura de

arco voltaico e descarga elétrica entre a ferramenta e a peça, e a área (S) é função da peça que se quer usinar, a maximização da corrente dependerá da minimização do *gap* (h) e da resistividade do eletrólito (r). Em outras palavras, a eficiência do processo dependerá da resistência do *gap*, que, por sua vez, dependerá de seu próprio valor (h) e da resistividade do eletrólito (r).

Como a taxa de remoção de material (TRM) depende da intensidade de corrente (I), o processo requer o uso de uma fonte de alta amperagem, sendo que corrente na faixa de 250 A a 10.000 A são muito comuns na prática.

Sendo a área efetiva de trabalho (S) dependente da geometria da peça a ser usinada, o parâmetro mais utilizado em usinagem eletroquímica é a **densidade de corrente**, definida na Expressão 2.16.

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.16)$$

onde:

**J** é a densidade de corrente (geralmente em A/cm<sup>2</sup>);

**I** é a intensidade de corrente;

Das Expressões 2.15 e 2.16, resulta a Expressão 2.17.

$$J = \frac{V}{h \cdot r} \quad (2.17)$$

Assim sendo, a expressão para o cálculo da taxa de remoção de material torna-se:

$$TRM = \frac{E \cdot V \cdot S}{h \cdot r \cdot \rho} \quad (2.18)$$

Em conclusão, parâmetros como temperatura do eletrólito, pureza (concentração de hidróxidos do metal da peça), afetam a resistência do *gap* e portanto influenciam na eficiência do processo. Por esta razão, um eficiente sistema de filtragem do eletrólito deve ser usado, para remover as partículas maiores em suspensão (hidróxidos do metal da peça). As impureza do eletrólito afetam não somente a eficiência do processo, mas também nas alterações geométricas produzida nas peças. Quando essas partículas apresentam dimensões consideráveis, podem causar curto circuito e abertura de arco voltagem, visto que o *gap* (Expressão 2.14) é muito pequeno, para muitos casos variando de 0,025 a 0,76 mm de acordo com **Benedict** (1987). Ainda de acordo com o referido autor, isto afetaria a integridade superficial da peça e provocaria danos tanto na ferramenta como na peça.

As Expressões 2.11 e 2.18 para o cálculo da taxa de remoção de material são válidas também para o caso de o material ser uma liga. A única diferença é que, neste caso, o equivalente eletroquímico ( $E$ ) é considerado como uma média ponderada dos diferentes equivalentes eletroquímicos dos componentes da liga, onde se leva em conta seus respectivos percentuais presentes na mesma.

## 2.2. Acuracidade

A usinagem eletroquímica é um processo que, normalmente, não apresenta boa acuracidade em termos das alterações geométricas produzidas nas peças como por exemplo, conicidade e sobre-corte lateral no processo de furação. Vários fatores influenciam diretamente

na acuracidade das peças produzidas por este processo, que devem ser bem selecionados para proporcionar o melhor resultado possível. Os principais fatores são: o sistema de banho com o jato eletrolítico, a voltagem, a velocidade de avanço da ferramenta, o tipo de eletrólito, o sistema de filtragem e o recobrimento da ferramenta.

O jato eletrolítico influi decisivamente na acuracidade das peças pois é composto de íons que irão reagir com as diferentes partes da peça, conforme a distribuição do jato. De acordo com **Benedict** (1987), para se obter uma remoção de material mais uniforme, melhor acuracidade das peças e reduzir os riscos de curto-circuito pela presença de resíduos da usinagem, o jato do eletrólito deve ser banhado por fora da ferramenta e succionado pelo interior da mesma, para o processo de furação.

Variações na voltagem afetam severamente o sobre-corte, sendo que quanto maior a voltagem, maior será o sobre-corte. Segundo **Pandey e Shan** (1980), as variações na voltagem de usinagem devem ser mínimas. Este fator está diretamente ligado à escolha da fonte de corrente.

A velocidade de avanço da ferramenta é proporcional a taxa de remoção de material (TRM), ou seja, quanto maior a taxa de remoção de material, maior será a velocidade de avanço da ferramenta, para uma mesma área de seção transversal da peça. Quanto mais rápido a ferramenta avançar, menos material será removido nas laterais do furo, proporcionando um sobre-corte lateral menor. **Andrade** (1993) constatou alterações na conicidade de furos usinados em chapas de aço. A Figura 2.4 apresenta um desenho esquemático de uma das chapas ao final dos ensaios. O resultado apresentado foi obtido utilizando uma ferramenta de cobre de 6 mm de diâmetro, sem recobrimento, e a velocidade de avanço desta foi de 6 mm/min até a metade da espessura da chapa e de 12 mm/min no restante.

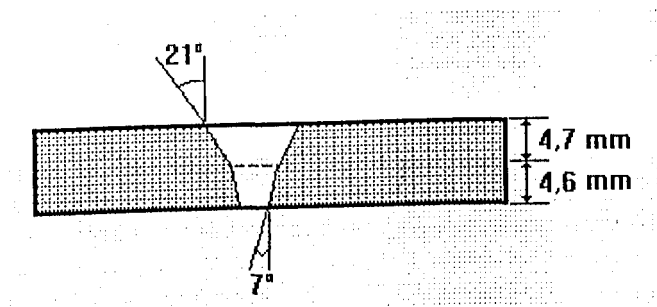


Figura 2.4: Vista esquemática de uma chapa de aço, furada pelo processo eletroquímico (Andrade, 1993).

Devido as reações químicas e a passagem de corrente através do *gap*, há um aumento da temperatura nesta região. Este aquecimento prejudica o desempenho do processo em termos de acuracidade pois, provocará um aumento na condutividade do eletrólito, aumentando a remoção de material em regiões não desejadas. Utilizando uma velocidade do eletrólito adequada, este problema é minimizado.

De acordo com **McGeough** (1988), a escolha do tipo de eletrólito a ser utilizado também tem um papel importante. O Cloreto de Sódio (NaCl), por exemplo, produz peças menos acuradas do que o Nitrato de Sódio (NaNO<sub>3</sub>). Este último possui um melhor controle dimensional devido à sua curva característica de eficiência de corrente por densidade de corrente, ilustrada na Figura 2.5.

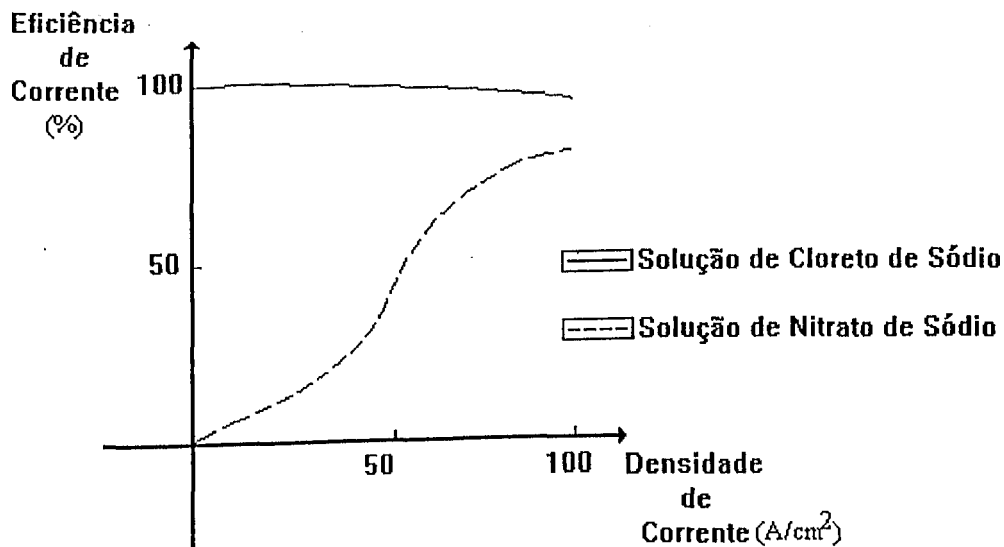


Figura 2.5: Gráfico que apresenta as curvas características de eficiência de corrente por densidade de corrente de uma solução de NaCl e de uma solução de NaNO<sub>3</sub> (McGeough, 1988).

Fazendo-se uma comparação entre as duas curvas apresentadas na Figura 2.5, 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, os grandes valores da 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 o Nitrato de Sódio), ocorrerá menos arranque de material, o que é desejado. A



Figura 2.6 ilustra a diferença entre uma peça usinada com Cloreto de Sódio e outra com Nitrato de Sódio.

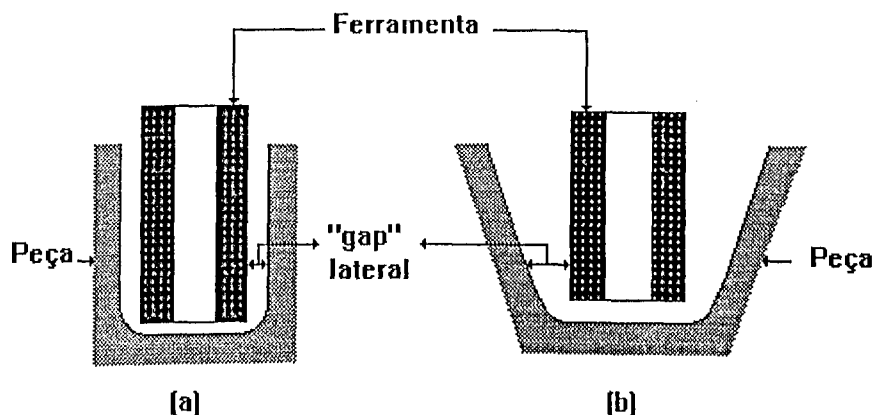


Figura 2.6: Furação de peças utilizando os seguintes eletrólitos (McGeough, 1988):

(a) Solução de Nitrato de Sódio;      (b) Solução de Cloreto de Sódio.

O sistema de filtragem, vide capítulo 3, é responsável pela limpeza do eletrólito. Os detritos, oriundos da usinagem, devem ser removidos do eletrólito para evitar que estes se alojem na região do *gap*, o que poderia causar curto-circuito entre a ferramenta e a peça, prejudicando a acuracidade das mesmas.

O recobrimento isolante da ferramenta nas regiões onde não devem ocorrer reações é outro fator que vem atuar no sentido de melhorar a acuracidade do processo. No processo de furação, por exemplo, a ferramenta deverá ter as suas laterais recobertas com material isolante pois, minimizará a passagem de corrente elétrica nesta região. Devido a esse fato, menos material da peça será arrancado pelas laterais da ferramenta, diminuindo o sobre-corte lateral.

O material do recobrimento deverá também ser resistente à corrosão, e uniforme em toda a superfície da ferramenta.

De acordo com o **Metal's Handbook** (1989), para o processo de furação, normalmente, tem-se obtido tolerâncias da ordem de 0,127 mm, para condições usuais de corte e 0,013 mm em condições especiais. Para condições usuais, ainda, o sobre-corte lateral da ferramenta é de aproximadamente 0,12 mm, e a conicidade em torno de 0,025 mm/mm.

### 2.3. Integridade Superficial

A integridade superficial é um dos pontos altos do processo de usinagem eletroquímica. Isto se deve ao fato (apresentado no capítulo 1) de que neste processo ocorre o arrancamento de átomo por átomo do material da peça, e também por não haver geração significativa de calor. Sendo assim, não ocorrem transformações térmicas nas superfícies usinadas, minimizando, desta forma, os problemas com trincas e concentração de tensão.

Na usinagem eletroquímica, 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 tipo do eletrólito é de suma importância para se obter boa integridade. Segundo **Benedict** (1987), a seleção imprópria do eletrólito ou a densidade de corrente baixa, pode levar a uma condição conhecida como ataque intergranular. Esta condição ocorre quando o processo dissolve o contorno do grão antes do real grão metálico. Se não for detectado, o ataque intergranular pode causar falha por fadiga da peça.

Ainda de acordo com **Benedict** (1987), uma peça produzida pelo processo de usinagem eletroquímica deve ter uma resistência a fadiga ligeiramente menor, quando

comparado com alguns processos tradicionais. Isto se deve ao fato que estes últimos muitas vezes deixam a superfície da peça em um estado favorável de tensão residual de compressão, o que não ocorre nos processo de usinagem eletroquímica onde o material da peça é removido sem induzir qualquer tensão residual na mesma. O martelamento (*shot pinning*) pode ser usado para melhorar as propriedades de fadiga das peças processadas através da usinagem eletroquímica, produzindo uma tensão residual compressiva na superfície da peça.

De acordo com **McGeough** (1988), valores típicos de rugosidade média são da ordem de 1  $\mu\text{m}$ , atingindo 0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$  no polimento eletroquímico.

**Saushkin et al** (1995), obtiveram valores da ordem de 0,32  $\mu\text{m}$  para a rugosidade, no acabamento de matrizes de aço a quente 5CrNiMo, utilizando uma solução orgânica como eletrólito, que foi previamente estudada, e a densidade de corrente foi em torno de 1,2A/cm<sup>2</sup>.

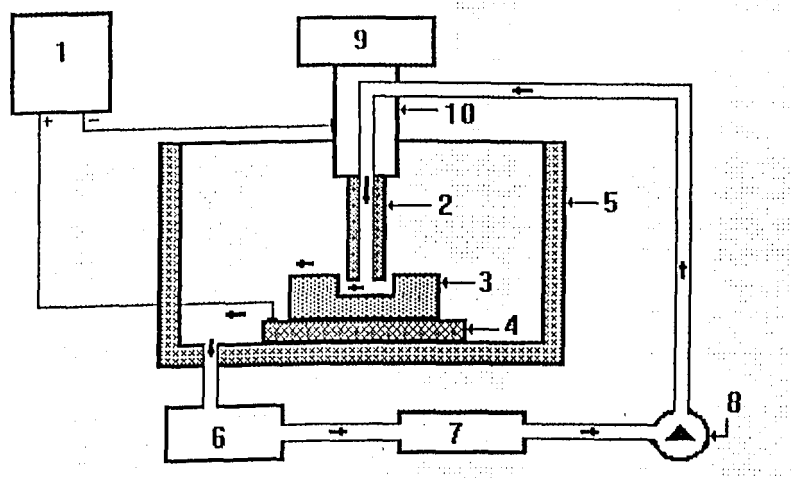
**McGeough** (1988) apresenta também, valores de rugosidade média em torno de 0,1  $\mu\text{m}$  na usinagem de aço cromo-níquel, utilizando como eletrólito uma solução de NaCl em condições de acabamento.

00308/97

### 3 - BASES CONCEITUAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA.

O equipamento de usinagem eletroquímica compõe-se, basicamente, de uma **fonte de corrente elétrica**, uma **unidade mecânica** e uma **unidade eletrolítica**. A unidade mecânica é composta de uma mesa que suporta a cuba eletrolítica e a coluna que suporta o cabeçote porta-ferramenta. A unidade eletrolítica compõe-se de reservatório, bombas, filtros e instrumentos para a avaliação de parâmetros como vazão, pressão e temperatura do eletrólito.

Segundo McGeough (1988), tal equipamento pode ser esquematizado conforme a Figura 3.1.



- |                                 |                                    |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 1 - Fonte de Corrente Contínua; | 6 - Reservatório do Eletrólito;    |
| 2 - Ferramenta ;                | 7 - Filtros;                       |
| 3 - Peça a ser usinada;         | 8 - Bomba;                         |
| 4 - Suporte de Fixação;         | 9 - Sistema de Avanço do Cabeçote; |
| 5 - Cuba Eletrolítica;          | 10 - Cabeçote Porta-Ferramenta.    |

Figura 3.1: Esquema de um equipamento de usinagem eletroquímica.

No referido esquema, são apresentados apenas os principais componentes. Neste, o pólo positivo da fonte de corrente elétrica é ligado à peça e o pólo negativo ao eletrodo-ferramenta, conforme é sugerido na Figura 2.2. O circuito eletrolítico (salmoura) é composto por uma bomba, construída com material resistente à corrosão, um reservatório, responsável pelo armazenamento deste eletrólito, e um filtro no qual são retirados os detritos gerados durante a usinagem. A cuba eletrolítica, que é o local onde ocorre a usinagem propriamente dita, é hermeticamente fechada para evitar que escapem vapores corrosivos para o meio ambiente.

A ferramenta, que deve ser fabricada com material condutor, é acoplada ao cabeçote porta-ferramenta. A ferramenta e o cabeçote avançam em direção à peça pela ação de um servomecanismo que, na maioria das vezes, é responsável pela manutenção do *gap* constante.

Os itens seguintes tratam com mais detalhes cada um dos três compartimentos acima citados.

### 3.1. Fonte de Corrente

Como exposto no capítulo 2, e também de acordo com **Rumyantsev e Davydov** (1989), a fonte deverá ser do tipo tensão constante e fornecer baixa voltagem (5V a 15V) e alta amperagem (300A a 25 000A). Os circuitos elétricos da fonte devem apresentar um sistema de proteção contra curto-circuito e sobrecargas. Estes inconvenientes podem ser causados pela presença de detritos na região do *gap* ou também pelo mau funcionamento do mecanismo de avanço.

De acordo com **Pandey e Shan** (1980), geralmente são utilizadas fontes de correntes alternada, trifásica, 440V, sendo que estas possuem um transformador e um retificador

responsáveis pela conversão que proporciona na saída uma voltagem baixa e corrente contínua. Um dos métodos mais utilizados para fazer esta conversão é aquele onde um reator saturável é conectado em série com o enrolamento principal do transformador.

Ainda segundo os referidos autores, o uso de retificadores de silício vem se tornando muito comum para o controle da tensão em máquinas de usinagem eletroquímica, isto porque estes são leves e compactos.

Segundo **Rumyantsev e Davydov (1989)**, uma fonte de corrente em equipamentos de usinagem eletroquímica deve apresentar as seguintes características: ser versátil, ou seja, capaz de trabalhar tanto em corrente contínua como em corrente pulsada, ter alto fator de potência e também deve ter alta velocidade de resposta dos sinais de controle e um efetivo sistema de proteção contra curto-circuito, tanto em corrente contínua como em corrente pulsada.

De acordo com **Rapid Powers (1994)**, publicações de um tradicional fornecedor de fontes, para processos eletrolíticos tais como, usinagem eletroquímica, eletrodeposição, galvanização, limpeza eletroquímica, rebarbação e recobrimento eletroquímico, as modernas fontes utilizadas são equipadas com retificadores semicondutores com circuitos tiristorizados, que proporcionam maior estabilidade de corrente e maior velocidade de resposta. Maiores detalhes a respeito de circuitos elétricos utilizados em equipamentos de usinagem eletroquímica podem ser encontrados em **Rumyantsev e Davydov (1989)**.

### **3.2. Unidade Eletrolítica**

Neste item, três aspectos merecem destaque: o circuito eletrolítico propriamente dito, as características dinâmicas do eletrólito (velocidade e pressão) e o sistema de filtragem.

### **- Circuito do Eletrólito:**

Na usinagem eletroquímica, o eletrólito tem três funções básicas: agir como condutor para facilitar a passagem de corrente elétrica entre a ferramenta e a peça, remover os detritos formados devido as reações químicas que ocorrem durante o processo na região do *gap* e resfriar a região de usinagem.

O circuito do eletrólito é um dos principais componentes da máquina, pois este, tem que garantir que o eletrólito permaneça com suas propriedades (temperatura, concentração, pH) praticamente constante na região de trabalho (*gap*). Este é um fator determinante para que o processo tenha um bom desempenho em termos de acuracidade e integridade superficial, conforme visto no capítulo 2.

Este circuito deve ser abrangente, ou seja, o mesmo circuito (componentes do circuito), poderá ser utilizado para vários tipos de eletrólitos, sem que isso acarrete grandes alterações no sistema.

Assim sendo, o circuito do eletrólito deverá conter: um reservatório, onde este será armazenado, uma bomba que forneça a pressão e velocidade necessária para que o eletrólito possa varrer os detritos já citados, um sistema de limpeza e controle de temperatura concentração e pH.

### **- Velocidade e Pressão do Eletrólito:**

Como já foi visto, o eletrólito é uma solução salina que se ioniza espontaneamente e mais ainda sob o efeito da corrente elétrica gerada pela fonte. Outro aspecto que também já foi

abordado é que alguns íons negativos combinam-se com os íons positivos da peça, resultando assim, o arrancamento de material da mesma.

Durante a usinagem pode ocorrer acúmulo de fragmentos metálicos, podendo até causar um curto-circuito entre a ferramenta e a peça, produzindo danos às mesmas. Para contornar este problema, o eletrólito é bombeado através do *gap* para a retirada dos produtos da eletrólise, sendo que isto também serve para diminuir os efeitos do aquecimento do eletrólito devido a corrente elétrica. De acordo com **McGeough** (1988) a faixa de velocidade do eletrólito usualmente utilizada em usinagem eletroquímica é de 3 a 30m/s, calculado pelo balanço térmico aplicado a cada caso. Segundo **McGeough** (1988), os valores da velocidade e pressão do eletrólito podem ser obtidos das Expressões 3.1 e 3.2.

$$v = \frac{J^2 \cdot h \cdot r}{\rho \cdot c \cdot \Delta T} \quad (3.1)$$

onde:

$v$  é a velocidade do eletrólito;

$r$  é a resistividade do eletrólito;

$\rho$  é a densidade do eletrólito;

$c$  é o calor específico do eletrólito;

$\Delta T$  é a diferença de temperatura do eletrólito na região do *gap* e fora desta.

Ainda de acordo com o referido autor, o fluxo do eletrólito em usinagem eletroquímica é, na maioria dos casos, turbulento. Assim, para que esta condição ocorra, o número de Reynolds (**Re**) tem que ser maior ou igual a 2300.



Considerando que  $Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot d_h}{\mu}$ , onde  $\bar{v}$  é a velocidade média do eletrólito,  $d_h$  é o diâmetro hidráulico médio do canal pelo qual passa o eletrólito e  $\mu$  é a viscosidade absoluta do eletrólito, tem-se a Expressão (3.2) para o cálculo da pressão do eletrólito (p).

$$p = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_f \cdot h \cdot \rho \cdot \bar{v}^2}{d_h} \quad (3.2)$$

onde  $c_f$  é o coeficiente de atrito e equivale a  $\frac{0,3164}{Re^{1/4}}$

#### - Sistema de Filtragem:

A limpeza do eletrólito é de fundamental importância para um bom desempenho em usinagem eletroquímica. Não só faz aumentar a vida do eletrólito, que em muitos casos é caro (Nitrato de Sódio, por exemplo), como ajuda na estabilidade do processo ao manter, aproximadamente constante, a corrente que passa pelo *gap*. A limpeza também diminui a corrosividade do ambiente, e evita que, esporadicamente, se tenha um curto circuito entre a ferramenta e a peça, o que prejudicaria em muito a usinagem, com o desgaste do eletrodo-ferramenta e a alteração das características de integridade superficial da peça.

Segundo **Benedict** (1989), alguns modelos industriais de usinagem utilizam os chamados filtros-prensa, para a separação das impurezas do eletrólito, tanto no circuito principal, como em um circuito paralelo destinado exclusivamente à limpeza do mesmo.

**Rumyantsev e Davydov** (1989), descrevem uma máquina de usinagem eletroquímica fabricada na Rússia, que conta com duas bombas no circuito eletrolítico, uma usada para bombear o eletrólito para a cuba e outra para retirá-lo fazendo o percurso da cuba para o

reservatório. Na referida máquina, a filtragem é feita através de uma centrifuga, com motor próprio.

Devido à complexidade das reações químicas que ocorrem durante a usinagem eletroquímica, a escolha do sistema de filtragem deve ser seguido de um estudo prévio do tipo de impureza que será produzida no processo.

### **3.3. Unidade Mecânica**

Segundo SME (1984) e Marty (1971), a estrutura da parte mecânica propriamente dita deve ser a mais rígida possível em decorrência das altas pressões e velocidades do jato eletrolítico, especialmente em equipamentos destinados à formação eletroquímica (cavidades, furos e corte). Não fosse assim, deformações provocariam desvios exagerados, prejudicando a acuracidade das peças. Outro fator importante é que o sistema deve transmitir o mínimo de vibrações para a ferramenta. À parte da estrutura da máquina, que segue os mesmos critérios de projeto de equipamentos convencionais de usinagem, como furadeira de coordenadas por exemplo, merecem destaque algumas observações sobre o mecanismo de avanço do cabeçote porta-ferramenta, o projeto da cuba eletrolítica e as ferramentas.

#### **- Mecanismo de Avanço:**

Durante a usinagem, o *gap* (distância entre a ferramenta e a peça) tende a aumentar devido a perda de material da peça. Para que isto não ocorra, ou seja, para que esta distância permaneça praticamente constante, é necessário que a ferramenta avance rumo à peça. O controle do avanço da ferramenta é feito por um mecanismo que deverá ser necessariamente

automático, para conferir alto desempenho ao equipamento. A Figura 3.2 mostra o esquema de um mecanismo de avanço.

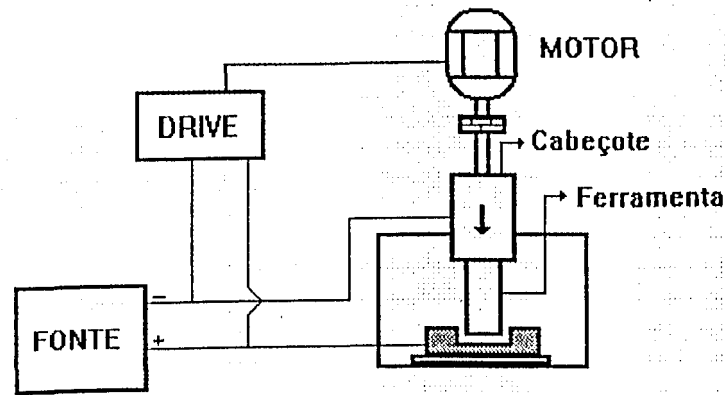


Figura 3.2: Esquema simplificado do mecanismo de avanço da ferramenta de um equipamento de usinagem eletroquímica.

Fazendo um resumo do funcionamento do mecanismo apresentado na Figura 3.2 tem-se que um *drive* faz o monitoramento da corrente elétrica que passa pela região do *gap*. Sabe-se que a medida que o *gap* aumenta (devido a erosão da peça), aumenta também a sua resistência com a conseqüente diminuição do valor da corrente. Quando isto acontece, o *drive* envia um sinal para o servomotor avançar a ferramenta.

Como já foi dito, o objetivo principal do sistema de avanço é manter o *gap* constante. Para isso, a taxa com que a ferramenta (catodo) avança tem que ser igual a taxa com o qual é retirado material da superfície da peça (anodo) devido a dissolução eletroquímica.

Na Figura 3.3, tem-se uma ferramenta que avança rumo à peça com uma velocidade de avanço  $v_a$ , *gap*  $h$  e voltagem  $V$ .

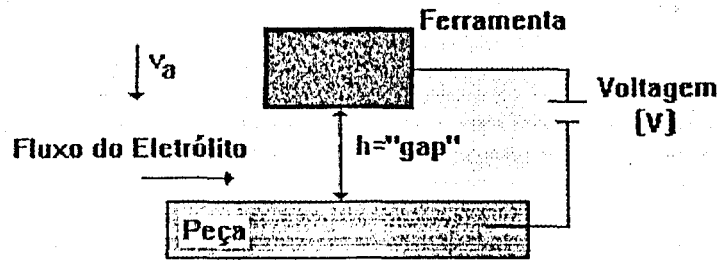


Figura 3.3: Esquema que simboliza o avanço da ferramenta em uma operação de usinagem eletroquímica.

Da Expressão 2.17, tem-se que a variação do *gap* com o tempo é dada por:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{A \cdot J}{z \cdot F \cdot \rho} - v_a \quad (3.3)$$

Da lei de Ohm, tem-se:

$$r = \frac{l}{k} \quad (3.4)$$

onde *k* é a condutividade do eletrólito.

Portanto, das Expressões (2.17), (3.3) e (3.4), tem-se:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{A \cdot k \cdot V}{z \cdot F \cdot \rho \cdot h} - v_a \quad (3.5)$$

Existem três soluções para a Expressão 3.5 que merecem uma abordagem mais específica. Na primeira hipótese a ferramenta não avança, ou seja,  $v_a$  é igual a zero. Este caso ocorre tipicamente no processo de rebarbação ou polimento eletroquímico. Para este caso a solução da Expressão 3.5 está mostrada na Expressão 3.6.

$$h^2(t) = h^2(0) + \frac{2 \cdot A \cdot k \cdot V \cdot t}{z \cdot F \cdot \rho} \quad (3.6)$$

onde  $h(0)$  é o *gap* inicial.

Fazendo uma análise da expressão acima, percebe-se que o *gap* é proporcional à raiz quadrada do tempo de usinagem, e esta expressão pode ser representada graficamente conforme mostra a Figura 3.4.

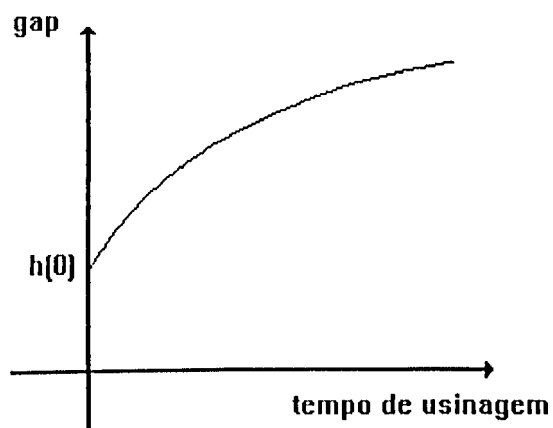


Figura 3.4: Variação do *gap* com o tempo quando não há avanço da ferramenta.

Outra condição deve ser verificada é quando a velocidade de avanço da ferramenta é constante. Neste caso, a ferramenta avança e o valor do *gap* tende a estabilizar-se num determinado valor depois de um certo tempo. A Expressão 3.7 apresenta a solução da Expressão 3.5 para esta condição.

$$t = \frac{1}{v_a} \cdot \left[ h(0) - h(t) + h_e \cdot \ln \frac{h(0) - h_e}{h(t) - h_e} \right] \quad (3.7)$$

onde  $h_e$  equivale a  $\frac{A \cdot k \cdot V}{z \cdot F \cdot \rho \cdot v_a}$ .

A Figura 3.5 apresenta o gráfico que representa a variação do *gap* com o tempo para a condição em que a velocidade de avanço da ferramenta é constante.

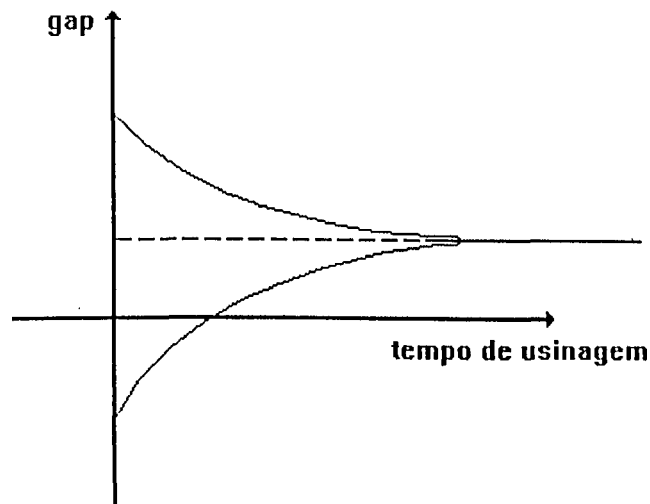


Figura 3.5: Gráfico da variação do *gap* com o tempo quando a velocidade de avanço da ferramenta for constante.

O último caso é aquele em que a ferramenta avança controlada por um sistema que faz o monitoramento de tensão e corrente. Através da variação destes parâmetros é que ocorre o deslocamento da ferramenta. Este sistema é muito utilizado nos processos de formação eletroquímica. Segundo **McGeough** (1988), estes processos apresentam alguns problemas tais como: o projeto da geometria da ferramenta, uma previsão do formato da peça para uma determinada geometria de ferramenta.

Os métodos numéricos para os cálculos das expressões que exprimem a relação do valor do *gap* com o tempo podem ser encontradas em **McGeough** (1974).

Recentemente, existem várias pesquisas em torno do sistema de avanço da ferramenta. Por exemplo, **Kozak et al** (1995) obtiveram resultados significativos, em termos de melhora da acuracidade das peças, utilizando uma ferramenta esférica cujo movimento de avanço era comandado numericamente.

Segundo **Rumyantsev e Davydov** (1989), os mecanismos de avanço da ferramenta podem ser eletromecânicos ou eletrohidráulicos, sendo que este último apresenta algumas vantagens em termos de movimentos mais suaves, recuo do cabeçote e velocidade de resposta. Os sistemas eletromecânicos são mais usados para faixas de velocidade de 0,2 mm/min a 24 mm/min, já os sistemas eletrohidráulicos são usados para faixas de 0,05 mm/min a 3 mm/min.

#### **- Ferramentas:**

Como visto no capítulo 2, teoricamente não há desgaste da ferramenta pois não há reação entre seu material e os cátions presentes no eletrólito. No entanto, alguns aspectos devem ser considerados na escolha de seu material: ter alta condutibilidade elétrica, ser

resistente à corrosão, pela alta corrosividade do eletrólito e ser de fácil usinagem. No projeto da ferramenta, deve-se considerar a sua rigidez para minimizar as deflexões ou vibrações devido ao fluxo eletrolítico. A Tabela 3.1 apresenta alguns materiais utilizados na confecção de ferramentas de usinagem eletroquímica.

Tabela 3.1: Materiais para ferramentas de usinagem eletroquímica (**Benedict**, 1987).

Alumínio	Liga cobre-manganês
Latão	Liga cobre-níquel
Bronze	Liga cobre-tungstênio
Grafite	Aço inoxidável
Cobre	Titânio (99% puro)

#### **- Cuba Eletrolítica:**

Fazendo um resumo de vários autores, pode-se dizer que a cuba eletrolítica é o local onde ocorre a usinagem, portanto, o seu tamanho e a sua forma dependerão das dimensões das peças a serem usinadas. A carcaça desta cuba deverá ser, preferencialmente, de material isolante para não permitir a passagem de corrente elétrica para a estrutura da máquina e também ser resistente à corrosão, pois o ambiente é altamente corrosivo.

No interior da cuba, onde será fixada a peça, deverá existir um suporte feito de material com boa condutividade elétrica para conectar o pólo positivo da fonte de corrente elétrica, isto é, quando a fonte não for conectada diretamente na peça, o que diminuiria o problema de perda de corrente.



Esta cuba deverá ser fixada em uma mesa de coordenadas, que em máquinas industriais são comandadas numericamente para dar precisão ao processo.

Quando a máquina trabalhar com alta amperagem, devido a formação de gases, principalmente  $H_2$ , um sistema de exaustão deve ser acoplado na cuba, evitando assim, o risco de explosão e a liberação de gases que muitas vezes são nocivos à saúde humana.

Fazendo-se uma média de vários autores citados (vide capítulos 1 e 2) tem-se a seguinte ordem de grandeza dos principais parâmetros de um equipamento de usinagem eletroquímica (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Parâmetros da Usinagem Eletroquímica (**Benedict, 1987; McGeough, 1988; Metals Handbook, 1989 e SME, 1984**).

Densidade de corrente	50 a 150 A/cm <sup>2</sup>
Voltagem	5 a 25 V
Pressão do eletrólito	7,7 kgf/cm <sup>2</sup>
Concentração do eletrólito	20 a 50%
Velocidade do eletrólito	3 a 30 m/s
Largura do <i>gap</i>	0,2 a 0,5 mm
Velocidade de avanço da ferramenta	1,2 mm/min

#### 4 -DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

Como mencionado na introdução, o principal objetivo deste trabalho foi contribuir com o desenvolvimento de um protótipo de usinagem eletroquímica, ora em curso no Laboratório de Usinagem Não-Tradicional.

Fazendo-se um breve resumo do histórico do desenvolvimento do referido protótipo, pode-se dizer que a primeira etapa foi realizada por **Watanabe, Pacheco e Cruz**, no período de 1990-91. Estes montaram o protótipo com componentes rudimentares tais como: fonte de corrente retificada para solda, depósito de água de fibrocimento como reservatório do eletrólito e bomba hidráulica. Não existia então, um sistema de avanço para a ferramenta, o que causava um aumento do *gap* no decorrer da usinagem, diminuindo proporcionalmente a taxa de remoção de material, conforme está no capítulo 2. Era possível apenas realizar o processo denominado polimento ou rebarbação eletroquímica. A usinagem da peça ocorria no interior do reservatório, dificultando a fixação e manuseio da mesma. A fonte de corrente elétrica utilizada proporcionava uma tensão de 80 V, ensejando a formação de arco voltáico com facilidade, o que, conforme considerações já feitas, é altamente indesejável no processo. A Figura 4.1 é uma vista geral do protótipo ao término da primeira etapa.

A segunda etapa do projeto, cuja vista geral acha-se apresentada na Figura 4.2, procurou sanar alguns problemas encontrados na primeira etapa, acarretando uma melhoria do protótipo. De acordo com **Postal (1993)** e **Andrade (1993)**, várias alterações foram feitas tais como: separação da cuba eletrolítica do reservatório do eletrólito, uma fonte de energia mais adequada, com menor tensão em vazio e maior amperagem. No projeto da cuba, levou-se em consideração a atuação corrosiva de eletrólito (solução de NaCl em água), determinando o uso

de acrílico para a construção da mesma. O sistema de avanço consistia de um dispositivo porca-parafuso, o que permitia o avanço manual da ferramenta de acordo com a queda de corrente lida em um multímetro.

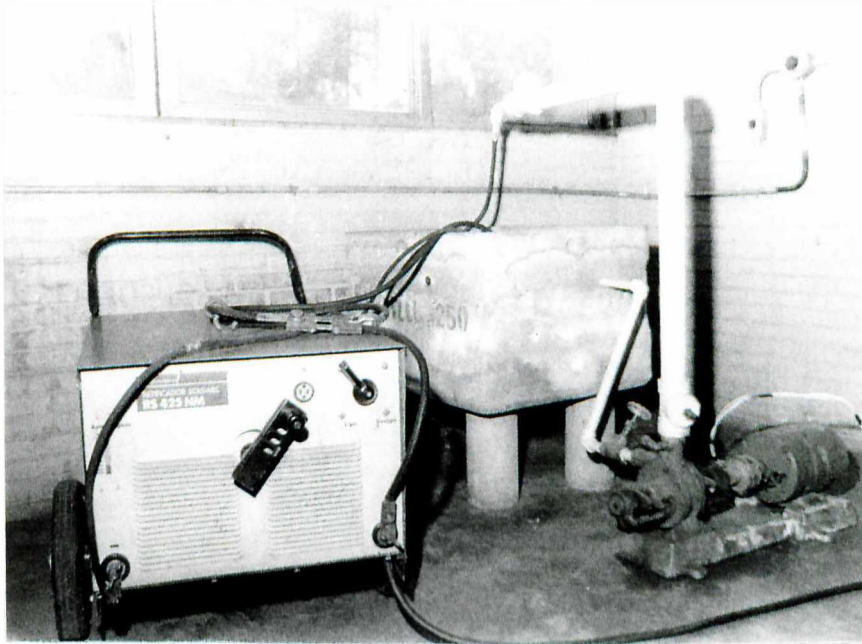


Figura 4.1: Vista Geral do Protótipo de Usinagem Eletroquímica ao término da primeira etapa.

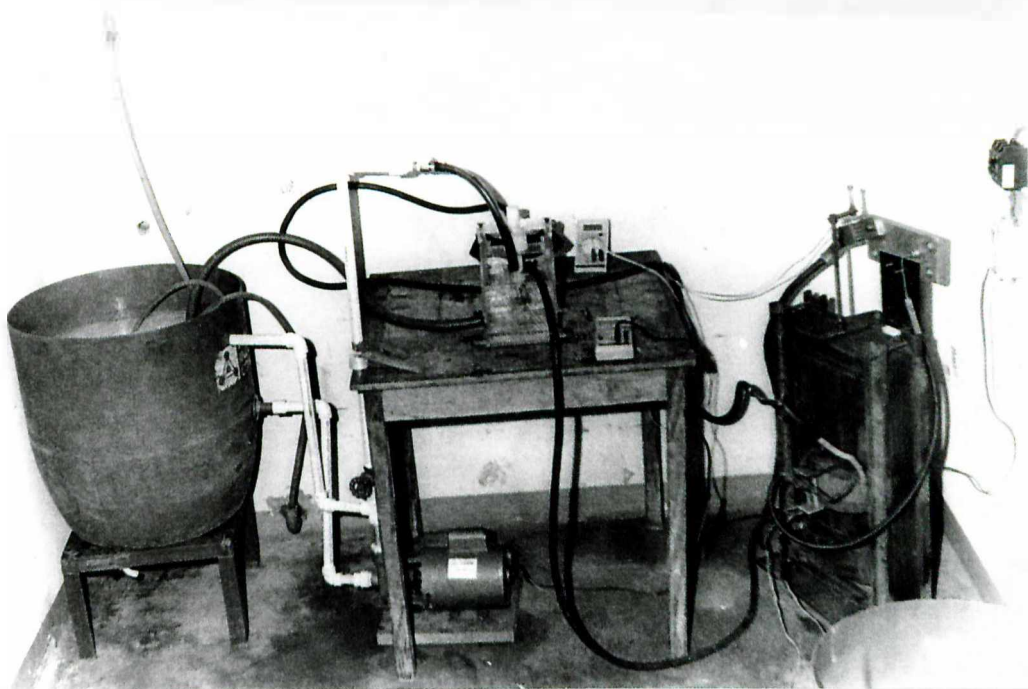


Figura 4.2: Vista Geral do Protótipo de Usinagem Eletroquímica ao término da segunda etapa.

A terceira etapa de desenvolvimento do protótipo é a que se refere esta dissertação, cuja vista geral ao seu término está mostrada na Figura 4.3. Como as alterações, em relação a etapa anterior, foram bastante profundas, elas serão abordadas com mais detalhes nos itens seguintes deste capítulo. Registra-se que cooperaram nesta etapa os estudantes e bolsistas de Iniciação Científica Maurício Postal, Fúlvio Corrales Andrade e Luis Felipe Mariani Jr.

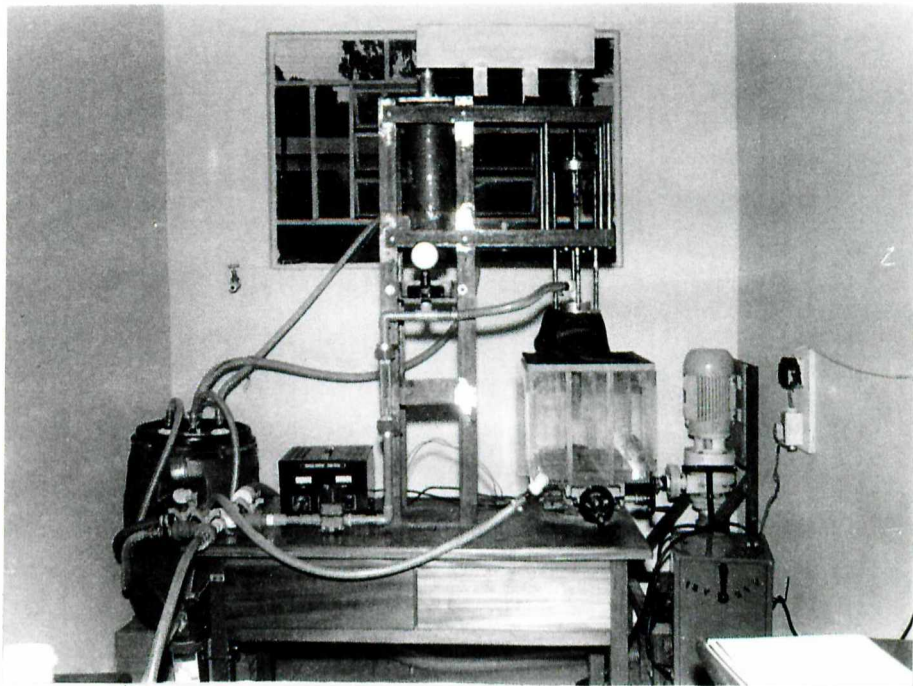


Figura 4.3: Vista Geral do Protótipo de Usinagem Eletroquímica ao término da terceira etapa.

Outro registro importante se refere aos desenhos dos componentes. Os originais, já com suas versões finais, acham-se arquivados no Laboratório de Usinagem Não-Traducional em códigos que tornam rápido o acesso aos interessados. Os desenhos apresentados no texto são, na maioria das vezes, apenas orientativos, sem os detalhes necessários para a fabricação.

Registra-se por último, que a fonte utilizada no protótipo possuía 2 voltagens de saída, 12 V e 24 V, e fora adquirida no comércio de Uberlândia como fonte para carregamento de

bateria, conforme está na fotografia da Figura 4.4. Foi a mesma fonte utilizada na segunda etapa do protótipo. Basicamente trata-se de um transformador associado a uma ponte de diodos que faz uma retificação parcial em meia onda da corrente conforme mostra o osciloscópio da Figura 4.4. A potência máxima da fonte era de 4,8 kW para um fator de trabalho de 100% visto que o máximo de corrente que se poderia usar sem sobrecarga era de 200 A para 24 V e 400 A para 12 V.

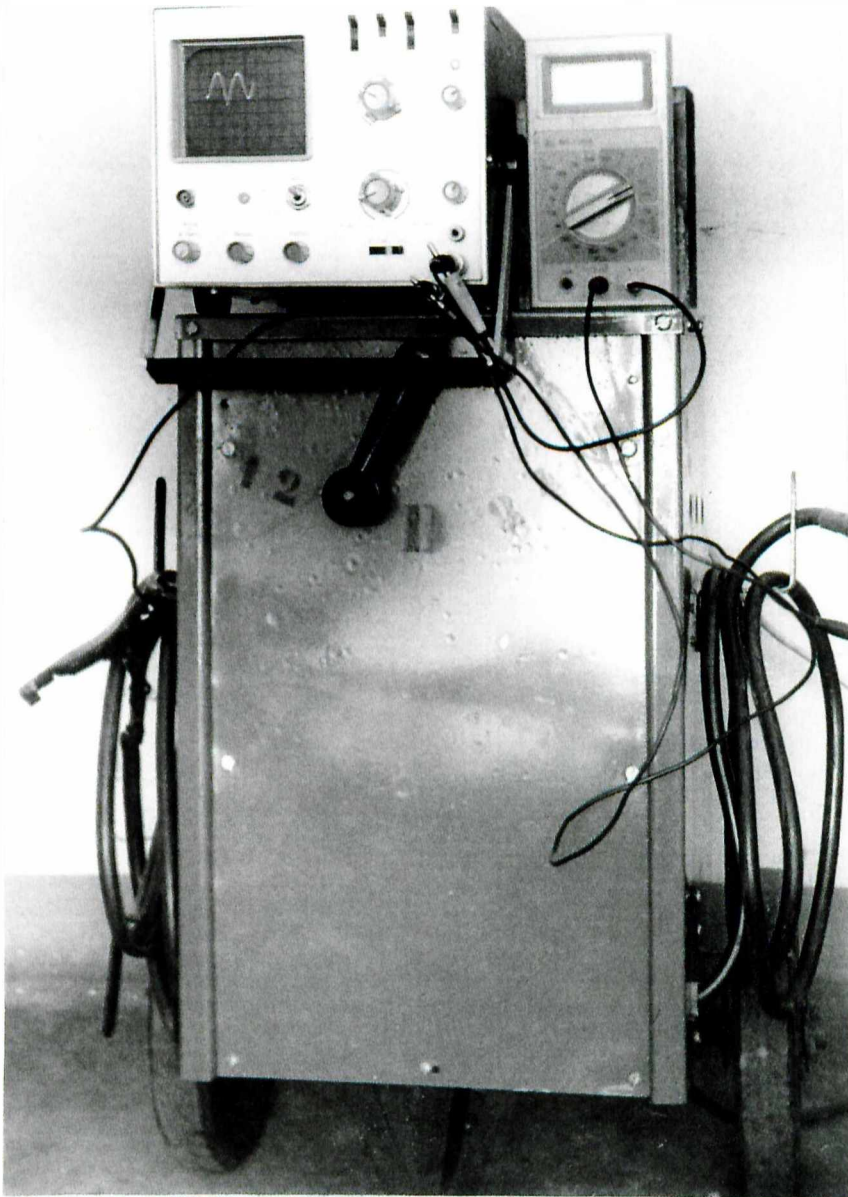


Figura 4.4: Vista da fonte de corrente utilizada no protótipo de usinagem eletroquímica.

#### 4.1. Projeto e Construção da Cuba Eletrolítica

A cuba eletrolítica é o local onde ocorre a usinagem, conforme descrito no capítulo 3. O ambiente dentro da cuba é extremamente corrosivo, pois o eletrólito é uma solução de sal em água. Assim sendo, optou-se pela utilização de chapas de acrílico de 10 mm de espessura para a construção da cuba. Outra vantagem é que devido ao fato do acrílico ser transparente, é possível a visualização da usinagem.

A cuba eletrolítica apresenta um volume útil aproximado de 36 l. A vantagem disto é que se pode trabalhar com peças com dimensões maiores. Na parte frontal, a cuba apresenta uma porta que permite um melhor acesso a peça a ser trabalhada, facilitando assim o posicionamento e a fixação da mesma. Esta porta desliza sobre guias feitas de acrílico. Um segmento de anel (*O ring*) garante a vedação da porta. As paredes laterais foram projetadas com uma sobresspessura, visando a instalação de acessórios tais como: fole de vedação e mangueiras externas de alimentação do eletrólito. Nervuras instaladas nas laterais propiciam maior rigidez à cuba.

Outro aspecto importante no desenvolvimento da cuba eletrolítica foi o projeto de uma plataforma de fixação (Figura 4.5) feita a partir de uma chapa de cobre eletrolítico de 10 mm de espessura, que além de servir de base para a fixação de peças, também é responsável pela transmissão de corrente elétrica para as mesmas. Esta plataforma é dotada de sulcos escalonados, que são importantes na fixação de peças de formas variadas e na disposição destas dentro da cuba. A confecção da plataforma de fixação envolveu a elaboração de um programa para que a mesma fosse usinada em uma fresadora CNC, garantindo melhor acabamento superficial e maior precisão nas tolerâncias dimensionais. A saliência retangular de

50 x 100 mm que se nota na Figura 4.5 foi a solução encontrada para a ligação elétrica com o pólo positivo da fonte, que em muito melhorou a operacionalidade do equipamento.

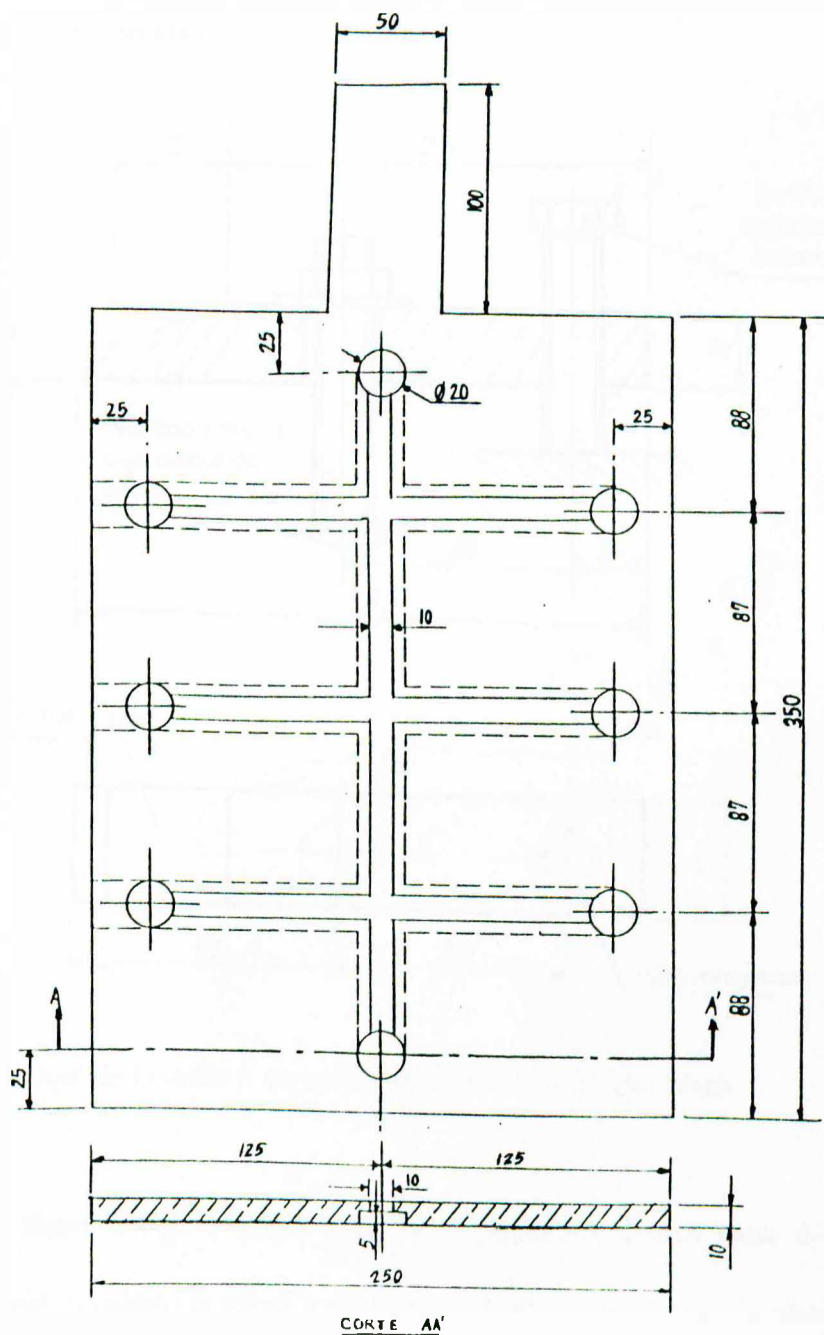


Figura 4.5: Plataforma de Fixação da Cuba Eletrolítica.

Para completar o sistema de fixação, foram projetados grampos de fixação (Figura 4.6), feitos também de cobre, que deslizam pelos sulcos, cobrindo toda área útil da base. Cada grampo é constituído de dois parafusos de latão M8x1.4, que podem ser regulados para fixar peças de espessuras variadas.

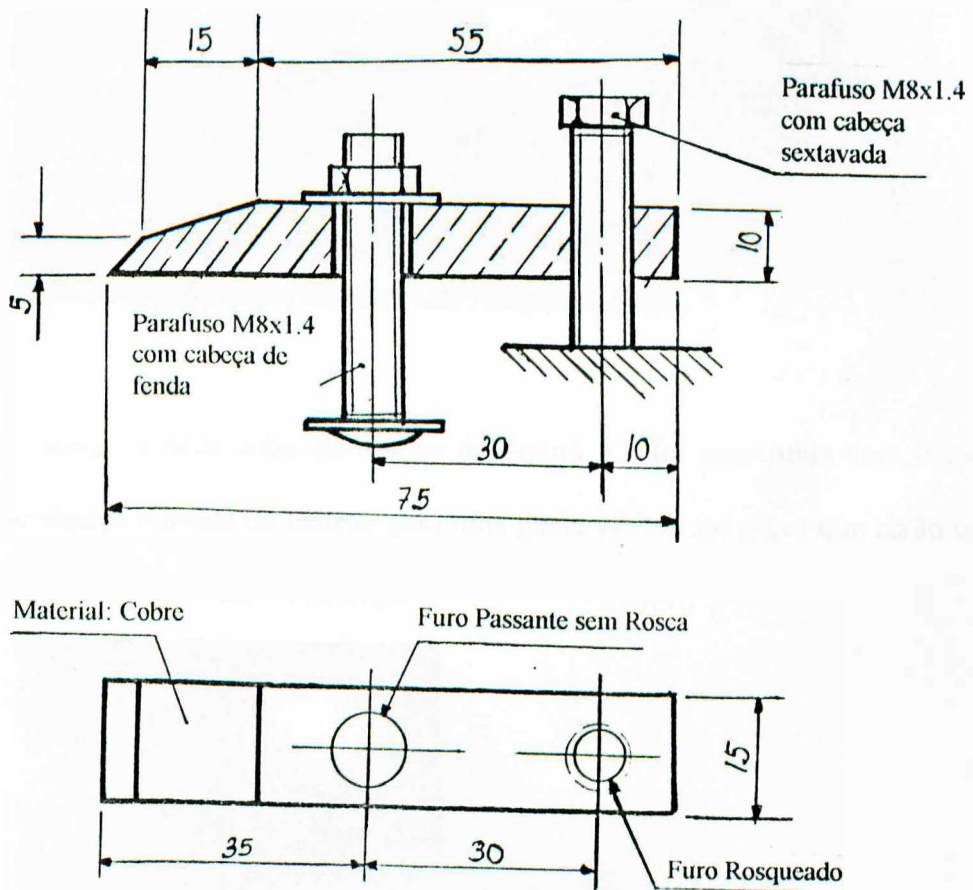


Figura 4.6: Grampo de Fixação a ser utilizado para a fixação das peças.

Como ilustra a Figura 4.7, a cuba foi montada sobre uma mesa de coordenadas de comando manual, tornando possível a usinagem em diferentes pontos da peça ou usinar várias peças em uma só montagem.



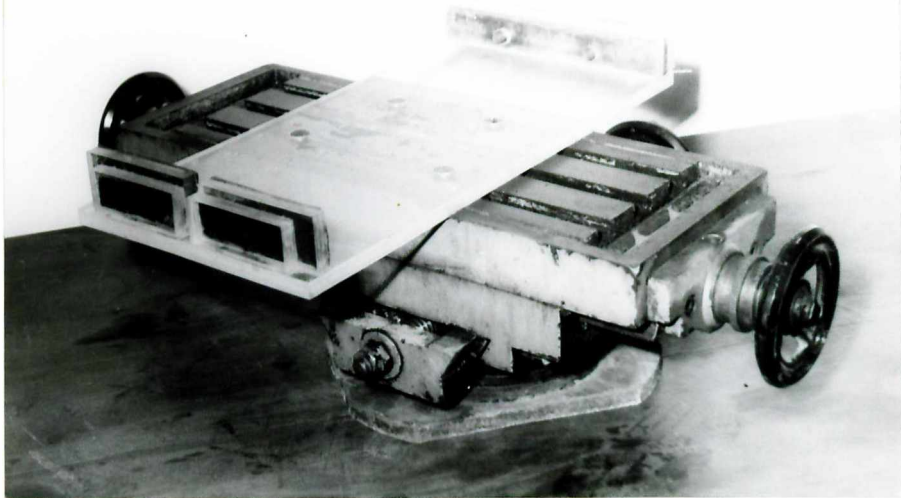


Figura 4.7: Mesa de Coordenadas e Sistema de Fixação da Cuba.

Em resumo, a nova cuba eletrolítica da Figura 4.8 foi construída com o intuito de proporcionar espaço e meios de fixação para uma gama variada de peças que serão utilizados nos ensaios experimentais com o protótipo.

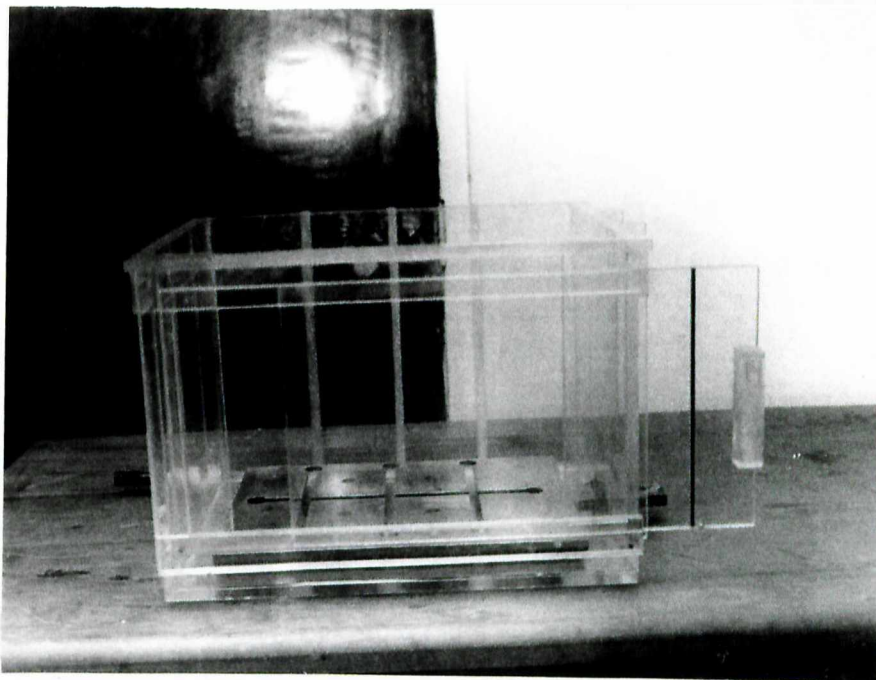


Figura 4.8: Vista Geral da Cuba Eletrolítica Utilizada no Protótipo .

## 4.2. Desenvolvimento do Sistema de Filtragem

A importância do sistema de filtragem, juntamente com as funções que este deve exercer em um equipamento de usinagem eletroquímica, estão detalhados no capítulo 3. Como também mencionado no referido capítulo, algumas máquinas industriais de usinagem eletroquímica utilizam filtros-prensa tanto no circuito principal como em um circuito paralelo destinado exclusivamente à limpeza do eletrólito. O filtro-prensa é, basicamente, um compartimento que possui uma sequência de telas com diferentes diâmetros de abertura onde são retidas as partículas. Estes filtros, no entanto, tem o defeito de introduzir grande perda de carga no sistema, sobrecarregando a bomba. Como a bomba deste protótipo é responsável pela circulação do eletrólito em todo circuito eletrolítico, optou-se pelo o uso de hidrociclone para partículas mais grossas e para as partículas mais finas foi utilizado um filtro que continha elementos filtrantes porosos enrolados em forma de cartucho cilíndrico, fabricados em prolipropileno. O tamanho da partícula a ser retida depende da porosidade dos elementos filtrantes. No mercado existem disponíveis cartuchos que retêm partículas a partir de 5  $\mu\text{m}$ , sendo que este deve ser trocado assim que atingi-se a saturação. O filtro utilizado no protótipo retinha partículas maiores que 5  $\mu\text{m}$  e proporcionava uma vazão máxima de 1 200 l/h

De acordo com Svarovsky (1981), para o projeto do sistema de filtragem por hidrociclone é necessário fazer uma análise das partículas a serem separadas, para só então ser possível a definição do tipo de hidrociclone a ser utilizado. Segundo o referido autor, a separação por esse processo só é possível para partículas maiores que 30  $\mu\text{m}$  no caso de densidades acima de 2  $\text{g}/\text{cm}^3$ . A análise granulométrica e a determinação da densidade das partículas serão abordados a seguir.

### - Análise Granulométrica e Densidade das Partículas a serem Separadas

Um material quando usinado eletroquimicamente produz uma “borra”. Esta “borra” é formada principalmente pelo hidróxido do metal preponderante do material da peça. No caso do aço com NaCl dissociado em água, a “borra” será de hidróxido de ferro 2 e hidróxido de ferro 3, de acordo com as Equações 2.6 e 2.7.

De acordo com Postal (1995), para analisar a “borra” foi usinado aço carbono ABNT 1020 em várias condições de corte e obtidas 5 amostras diferentes de sedimentos. O eletrólito do reservatório foi deixado em decantação para posterior retirada “borra”. A suspensão foi então transferida para o recipiente onde foi diluída, e após nova decantação retirou-se o excesso de água. O processo foi realizado várias vezes, de forma a reduzir a concentração do sal. A olho nu era possível a identificação ou visualização de algumas partículas suspensas. Esta suspensão era de granulação muito fina e tinha a aparência de poeira. Depois de secada (inicialmente mediante chama e depois com o auxílio de uma estufa), a amostra ficou pronta para a determinação da densidade e da granulometria.

O método de análise granulométrica utilizado foi o peneiramento. O equipamento do Departamento de Engenharia Química, onde foi feita a análise por peneiramento, consiste de um vibrador onde são colocadas as peneiras, sendo que cada uma possui um diâmetro de abertura. As peneiras de abertura maior são colocadas acima das de abertura menor. O pó é colocado na peneira superior e o vibrador permanece ligado por um certo tempo.

Nesta análise foram utilizadas nove peneiras com abertura de 37 a 595 $\mu$ m, conforme está na Tabela 4.1. O método de análise foi o seguinte: após o peneiramento fez-se a pesagem de massa retida em cada peneira. Os resultados estão colocados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados do Peneiramento

Peneira	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d( $\mu\text{m}$ )	595	420	297	210	149	62	53	44	37	fundo
massa(g)	2,77	2,66	2,15	2,09	2,15	4,08	0,33	1,02	0,86	1,01
massa retida em cada peneira (%)	14,5	13,9	11,2	10,9	11,2	21,3	1,7	5,3	4,5	5,3
massa total retida (%)	14,5	28,4	39,6	50,5	61,7	83,0	84,7	90,0	94,5	100,0

Analisando os resultados obtidos na Tabela 4.1 percebe-se que 94,5 % das partículas foram retidas até a peneira de diâmetro igual a 37  $\mu\text{m}$ . De posse destes dados, projetou-se o hidrociclone para reter partículas maiores que 37  $\mu\text{m}$ .

A densidade média da “borra” foi obtida através de um picnômetro em que cada uma das 5 amostras foi medida por 3 vezes a 25°C, resultando no valor 3,11  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

#### - Projeto do Hidrociclone, de acordo com Postal (1995)

O hidrociclone é um separador estático baseado na separação centrífuga num vórtice gerado por um corpo cônico, conforme define Svarovsky (1984). A alimentação, usualmente entrando tangencialmente dentro do ciclone, é dividida em fluxo descendente (*underflow*), que carrega a maior parte dos sólidos, e fluxo ascendente (*overflow*), que contém a maior parte do líquido e algumas partículas sólidas, conforme apresentado na Figura 4.9.

A Tabela 4.2 mostra alguns valores de projeto de hidrociclones, desde as menores até as maiores dimensões com parâmetros de serviço. A concentração do sólido no *underflow*

raramente ultrapassa 40 a 50% em volume, dependendo do tamanho e projeto da unidade, condições de operação e natureza dos sólidos que estão sendo separados.

Tabela 4.2: Parâmetros de Serviço de um Hidrociclone Individual (Svarovsky, 1984).

Diâmetro	10 mm a 2,5 m
Tam. da Partícula	2 a 250 $\mu$ m
Vazão	0,1 a 7200 m <sup>3</sup> /h
Queda de Pressão	0,34 a 6 bar

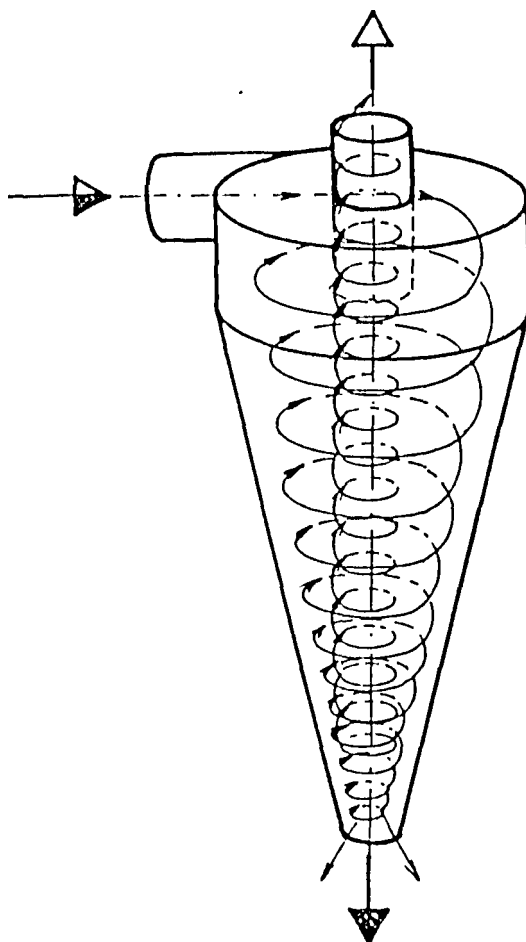


Figura 4.9: Perspectiva de um Hidrociclone mostrando esquematicamente o vórtice formado em seu interior.

Os principais méritos dos hidrociclones são os seguintes:

- São muito versáteis, pois podem ser utilizados na clarificação de líquidos, concentração de “borras”, separação de líquidos imiscíveis, desgaseificação de líquidos ou classificação do sólido de acordo com sua densidade ou forma;
- São simples, de baixo custo, fáceis de instalar e usar, requerendo pouca manutenção e estruturas de suporte;
- A existência de altas forças cisalhantes no fluxo é uma vantagem na classificação de sólidos pois quebra qualquer aglomerado.

As principais desvantagens dos hidrociclones são:

- São pouco flexíveis uma vez instalado e em operação, e muito sensíveis a flutuações na vazão (no caso de grandes vazões) e na concentração do sólido;
- Há limitações em seu uso que podem ser melhoradas com o emprego de vários estágios, mas há também custos adicionais;
- São susceptíveis à abrasão, embora haja meios de minimizá-la.

O dimensionamento de um hidrociclone não depende somente do tamanho das partículas, a vazão e a queda de pressão, mas também da geometria escolhida. Cada geometria desenvolvida por pesquisadores possui certas constantes adimensionais que já foram analisadas teórica e experimentalmente. Entre essas constantes tem-se:

- **$Stk_{50}$  (Stokes):** relação entre as forças de inércia e as forças hidrodinâmicas na partícula;
- **Eu (Euler):** coeficiente de resistência (relacionado à queda de pressão);
- **$k_p$  e  $n_p$ :** relacionam o número de Euler (Eu) com o número de Reynolds (Re).

Fora estas constantes, ainda há as constantes dimensionais, que definem o diâmetro de entrada, de saída, o comprimento total do hidrociclone e o ângulo do cone. De acordo com

Svarovsky (1983), para a geometria desenvolvida por Rietema, que está apresentada na Figura 4.10, as constantes são apresentadas na Tabela 4.3.

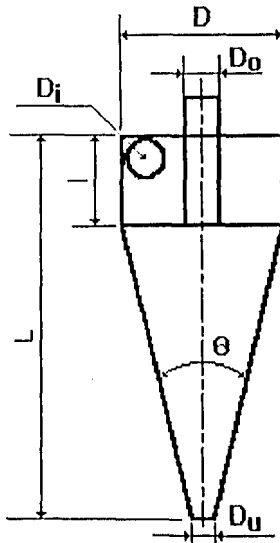


Figura 4.10: Esquema de um hidrociclone para a geometria de Rietema.

Tabela 4.3: Constantes para a Geometria de Rietema (Svarovsky, 1983).

Constantes	Valor
$D_i / D$	0,28
$D_o / D$	0,34
$L / D$	0,40
$L / D$	5
$\Theta$	20°
$Stk_{50} \times Eu$	0,0611
$k_p$	316
$\eta_p$	0,134

As equações gerais utilizadas no dimensionamento de hidrociclone, são apresentadas nas Expressões 4.1 e 4.2.

$$D = \left[ \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot k_p \cdot \Delta\rho}{72 \cdot Stk_{s0} \cdot Eu \cdot Q \cdot \mu} \cdot \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{n_p} \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi}\right)^{n_p + 2} \right]^{\frac{1}{n_p + 3}} \cdot N^{\left(\begin{smallmatrix} n_p + 1 \\ n_p + 3 \end{smallmatrix}\right)} \quad (4.1)$$

$$p = \frac{8 \cdot k_p \cdot \rho^{(1+n_p)} \cdot D^{(-4-n_p)}}{\pi^2} \cdot \left(\frac{Q}{N}\right)^{2+n_p} \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot \mu}\right)^{n_p} \quad (4.2)$$

onde:

**D** é o diâmetro do hidrociclone (m);

**$\phi$**  é o diâmetro mínimo da partícula a ser separada (m);

**$\Delta\rho$**  é a diferença de densidade entre o sólido e o líquido (kg/m<sup>3</sup>);

**$\rho$**  é a densidade do líquido (kg/m<sup>3</sup>);

**Q** é a vazão (m<sup>3</sup>/s);

**$\mu$**  é a viscosidade do líquido (Ns/m<sup>2</sup>);

**N** é o número de hidrociclones em paralelo;

**p** é a queda de pressão estática (N/m<sup>2</sup>).

Como já foi exposto anteriormente, o diâmetro mínimo da partícula ( $\phi$ ) que deve ser retida pelo hidrociclone é 37  $\mu\text{m}$ . Este e os demais valores utilizados no projeto estão apresentados na Tabela 4.4.



Tabela 4.4: Valores Utilizados no Projeto do Hidrociclone.

Parâmetros	Valores
diâmetro da partícula ( $\phi$ )	37 $\mu\text{m}$
densidade do líquido ( $\rho$ )	1190 $\text{kg/m}^3$
diferença de densidade ( $\Delta\rho$ )	1920 $\text{kg/m}^3$
vazão (Q)	2,5 $\text{m}^3/\text{h}$
viscosidade do líquido ( $\mu$ )	0,001 $\text{Ns/m}^2$
número de hidrociclones (N)	1

Com estes valores, foram feitos os cálculos das medidas do hidrociclone de acordo com a geometria de Rietema, mostrada na Figura 4.10. A Figura 4.11 ilustra o hidrociclone cotado com suas medidas finais.

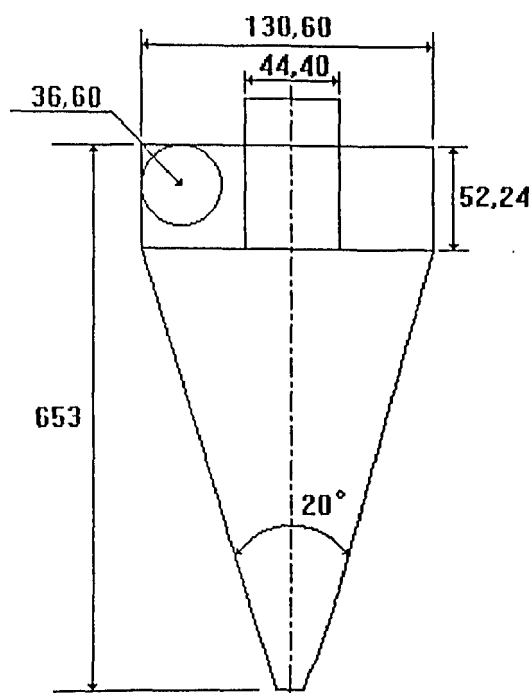
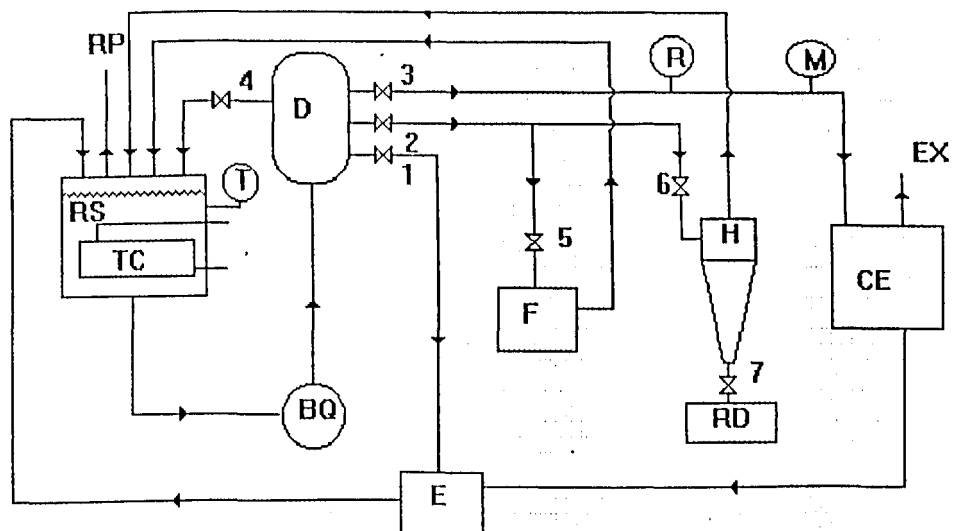


Figura 4.11: Vista do hidrociclone com suas dimensões internas.

Para a separação das partículas mais finas, até 5  $\mu\text{m}$ , foi utilizado um filtro poroso em forma de cartucho cilíndrico fabricado em prolipropileno. Estes filtros são muito utilizados nas indústrias, especialmente para a filtragem de líquidos corrosíveis. Este cartucho é fixado em uma carcaça que proporciona uma vazão máxima de 1 200 l/h. Os cartuchos são usados até atingir-se a saturação e logo depois substituídos.

#### 4.3. Desenvolvimento do Circuito Eletrolítico

Depois de algumas tentativas e experiências das etapas anteriores, chegou-se ao circuito apresentado na Figura 4.12.



BQ - bomba química

CE - cuba eletrolítica

D - distribuidor

E - ejetor

EX - exaustor

F - filtro

H - hidrociclone

M - manômetro

R - rotâmetro

RD - resíduos

RP - respiro

RS - reservatório

T - termômetro

TC - trocador de calor

1,2,...,7 - registros

Figura 4.12: Esquema do Circuito Eletrolítico.

No circuito eletrolítico apresentado na Figura 4.12 existe apenas uma bomba, ou seja, para que esta não fique sobrecarregada, a filtragem do eletrólito deve ser feita quando o protótipo não estiver usinando. A bomba utilizada foi uma bomba química modelo 421/3 fabricada em prolipropileno pela Bomax com potência igual a 5 CV. Esse circuito pode ser dividido em duas etapas, uma quando se estiver usinando e a outra para a limpeza do eletrólito. Na primeira etapa, o eletrólito é bombeado até um distribuidor (**D**). Neste instante os registros **1** e **3** estão abertos, o que permite a passagem do eletrólito para a cuba eletrolítica (**CE**) e para o ejetor (**E**), respectivamente. Este último, que funciona como um tubo venturi, succiona o eletrólito da cuba (**CE**) e o envia ao reservatório (**RS**). Antes de entrar na cuba eletrolítica, o eletrólito passa por um rotâmetro que, de acordo com **Delmée** (1983), é constituído por um tubo cônico com um flutuador de aço inox. A faixa de leitura deste varia de 100 l/h a 1000 l/h com resolução de 5 l/h. Neste mesmo percurso o eletrólito passa também por um manômetro com capacidade para medir pressões de até 6 kgf/cm<sup>2</sup> com resolução igual a 0,1 kgf/cm<sup>2</sup>. Na segunda etapa, quando ocorre a filtragem, na saída do distribuidor (**D**) somente o registro **2** está aberto (o registro **4** serve apenas para alívio de pressão). Neste percurso o eletrólito é de início filtrado no hidrociclone (registro **6** aberto) para a retirada das partículas mais grossas. Após a filtragem no hidrociclone (**H**) o eletrólito passa por uma limpeza mais fina no filtro (**F**) poroso de prolipropileno (registro **5** aberto). Após ser limpo o eletrólito retorna ao reservatório (**RS**), onde existe um termômetro que apresenta uma faixa de leitura de 0 a 150°C com resolução igual a 1°C.

A fim de não permitir a fuga de respingos e de vapores da cuba, foi construído um fole de borracha flexível, conforme está ilustrado na Figura 4.13. Este tem uma base de resina

acrílica através de grampos de aperto rápido. Uma braçadeira de aço inox fixa o fole no cabeçote porta-ferramenta.



Figura 4.13: Fole de Vedação da Cuba Eletrolítica.

#### 4.4. Desenvolvimento do Mecanismo de Avanço

O mecanismo de avanço tem por função controlar dois parâmetros fundamentais no processo de usinagem eletroquímica: o *gap* e a velocidade de avanço do cabeçote porta-ferramenta. O *gap* é a distância efetiva de trabalho da interface ferramenta-peça, conforme está no capítulo 2. Para se obter um bom desempenho na usinagem eletroquímica, este *gap* tem de ser praticamente constante durante a usinagem, e isso só será possível se a ferramenta avançar rumo à peça, pois, à medida que é arrancado material da peça o valor do *gap* aumenta. Como é conhecido, a velocidade com que a ferramenta avança no metal a ser usinado é denominada de velocidade de avanço. Esta velocidade depende da taxa de remoção de material e da área

efetiva de trabalho da ferramenta, sendo assim depende também do *gap*. Na verdade a velocidade de avanço trabalha na manutenção do valor do *gap* à medida que ocorre a remoção eletroquímica de material. Fica claro, então, que a eficiência do processo de usinagem eletroquímica é fortemente influenciada pelo controle destes dois parâmetros e que a utilização de um mecanismo de avanço da ferramenta é imprescindível à funcionalidade do mesmo.

O mecanismo de avanço em questão é do tipo velocidade de avanço constante para o qual é válida a Expressão 3.7. Neste caso, conforme ilustra o gráfico da Figura 3.5, depois de um certo tempo o *gap* atinge um valor de equilíbrio e permanece constante durante o restante da usinagem. O diagrama do mecanismo é o que se apresenta na Figura 4.14, gerando sempre uma velocidade de avanço constante, conforme seja a rotação imposta ao motor pela voltagem gerada na fonte.

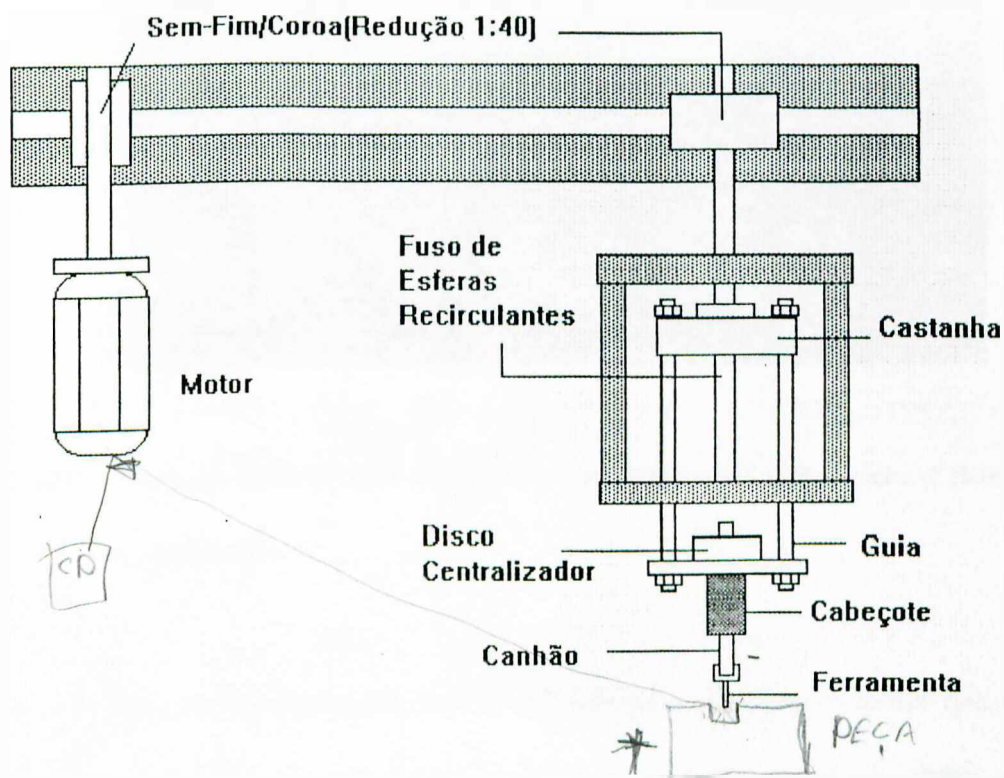


Figura 4.14: Vista geral do mecanismo de avanço do cabeçote porta-ferramenta com denominação das peças.

Todo o conjunto do mecanismo de avanço foi fixado em um suporte, especialmente projetado com 4 cantoneiras (50,8mm x 50,8mm x 4,8mm) soldadas em duas chapas de aço ABNT 1020 com 12,7mm de espessura para proporcionar rigidez ao sistema. Na parte superior deste suporte foi fixado o motor de corrente contínua, sendo que a extremidade inferior serviu para fixar o suporte na mesa. O redutor foi preso também neste suporte com borrachas e os acoplamentos do mesmo com os eixos do motor e do fuso são de borracha também para evitar a transmissão de vibração para o sistema (Figura 4.15).

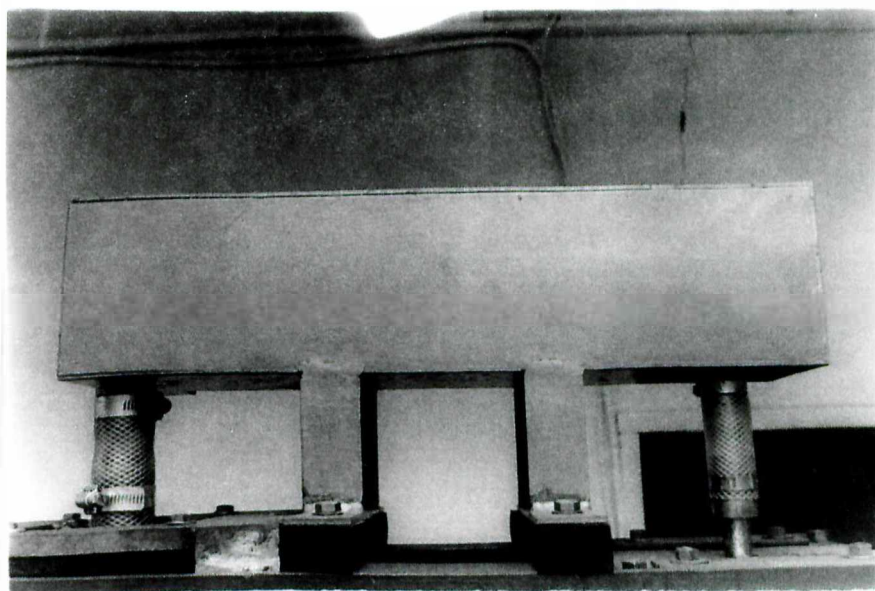


Figura 4.15: Vista do Redutor que transmite o movimento do motor para o fuso de esferas recirculantes.

Uma fonte de corrente contínua foi utilizada para alimentar o motor que possui uma rotação máxima de 3000 rpm. Esta fonte possui uma potência máxima de 300W, com tensão variando de 0-30V e corrente de 0-10A. A velocidade de avanço da ferramenta é regulada

através do ajuste da tensão da fonte, ou seja, para uma determinada tensão era medida a distância percorrida pelo cabeçote num determinado tempo através de um relógio comparador, obtendo-se assim a velocidade de avanço para vários valores da tensão. A Figura 4.16 mostra uma fotografia parcial do mecanismo de avanço do protótipo.

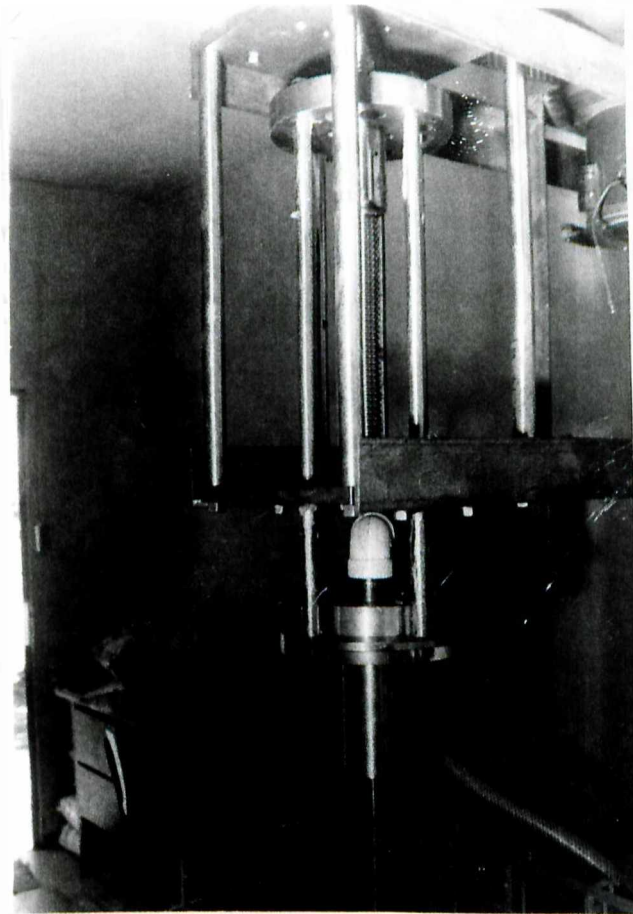


Figura 4.16: Foto parcial do mecanismo de avanço do protótipo.

#### **- Conjunto Fuso de Esferas Recirculantes e Castanha.**

O fuso, de marca EGROJ, tipo FL-25.5, possui 5 mm de passo e 25 mm de diâmetro. Nele está acoplado uma castanha (porca), responsável pela linearização do movimento

rotacional do fuso. A escolha por um fuso de esferas recirculantes ao invés de um fuso tradicional, é devido ao baixo atrito entre fuso e castanha e ao grau de precisão na transferência de movimento, evitando assim folgas prejudiciais. O fuso é montado sobre dois mancais de rolamentos cônicos, com a finalidade de se evitar a influência de esforços radiais e axiais, devido ao movimento do motor.

#### **- Guias**

Com o objetivo de garantir precisão ao sistema, foram projetadas 4 guias cilíndricas de aço ABNT 1040 igualmente espaçadas a 90°. A estrutura-suporte das guias cilíndricas foi montada por aparafusamento para evitar deformações por soldagem e o acabamento das guias foi feito com abrasivo em pó de SiC, granulação 400 *mesh* atuando durante cerca de 100 horas em vazio com o auxílio de chaves de reversão elétrica de movimentos.

#### **- Disco Centralizador e Suporte do Canhão**

Estes dois elementos em conjunto desempenham duas funções importantes no sistema: garantir o posicionamento preciso do canhão e evitar a passagem de corrente elétrica para o resto do sistema. Ambos são revestidos internamente por uma camada de tecnil e que quando montados envolvem a parte médio-superior do canhão não permitindo a fuga de corrente elétrica para os demais elementos do sistema. Este isolamento é importante pois a passagem de corrente por interfaces de metais pode dar origem a pontos de corrosão, além de perda de corrente do processo. O suporte do canhão possui um tubo de aço inox soldado à base que tem a função de fazer o alinhamento do canhão em relação à plataforma da cuba eletrolítica. Foi adotado o aço inox por este ser um aço resistente à ação da corrosão devido aos vapores



formados no interior da cuba. O disco centralizador é necessário para se ter o assentamento correto da parte superior do canhão na base do suporte do mesmo.

#### **- Canhão**

O canhão é um dos elementos mais importantes do sistema de avanço, pois é através dele que se tem a passagem de corrente elétrica e do fluxo de eletrólito. Constitui um cilindro de cobre eletrolítico (melhor condutibilidade e maior resistência a corrosão) de 30 mm de diâmetro com um furo vazado de 10mm de diâmetro. O canhão é a parte efetiva do sistema que estará em contato direto com o meio interno à cuba eletrolítica durante o processo de usinagem. Possui também o compartimento de acomodação da ferramenta segundo uma conicidade leve de 2°, facilitando o acoplamento e desacoplamento da mesma.

## 5 - ENSAIOS DE USINAGEM E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Toda máquina ou mecanismo após ser construído passa por um tempo de adequação às condições de serviços. Antes do protótipo ser utilizado para a usinagem, todos os componentes foram testados separadamente. O reservatório foi preenchido com água para que esta circulasse por todo o circuito eletrolítico com o intuito de detectar vazamentos. Para obter-se a velocidade de avanço da ferramenta para uma determinada tensão da fonte que alimenta o motor, foi instalado um relógio comparador para medir o deslocamento do cabeçote porta-ferramenta em um determinado tempo.

A ligação da fonte de corrente do protótipo está esquematizada na Figura 5.1.

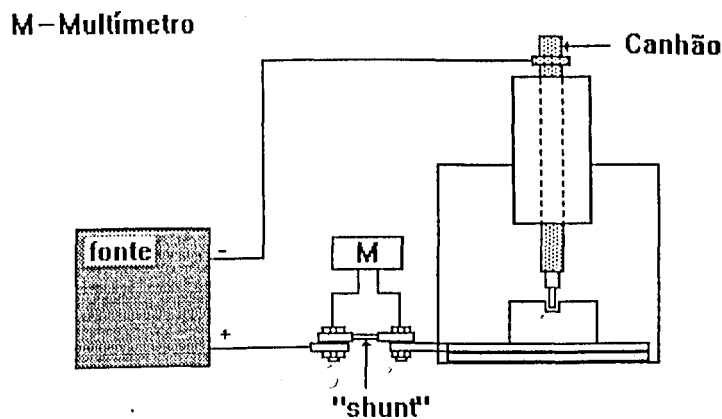


Figura 5.1: Esquema da parte elétrica do protótipo.

Conforme apresentado na Figura 5.1, o pólo negativo da fonte está ligado no canhão (suporte da ferramenta), e o pólo positivo no *shunt*, que é uma resistência acoplada ao circuito para possibilitar a leitura da corrente fornecida pela fonte. O *shunt* está aparafusado na mesa

da cuba eletrolítica, descrita no capítulo 4. Um multímetro acoplado ao *shunt* faz a leitura da voltagem. Como a resistência do *shunt* é igual a 8 A/mV, pode-se determinar a corrente elétrica do circuito como sendo o valor lido no multímetro em mV multiplicado por 8, resultando o valor da corrente em Ampère.

Com o protótipo pronto para funcionar em conjunto, foram realizados testes preliminares para observar-se o comportamento do mesmo. Para isso, foram feitos furos em uma chapa de aço ABNT 1020 e rebarbações em anéis do mesmo aço. As ferramentas utilizadas nestes ensaios são mostradas na Figura 5.2. Ambas as ferramentas foram revestidas conforme descrição a ser feita no item 5.1. A menor foi feita para execução de pré-furos de 4 mm de diâmetro e a da direita para execução de furos de 8 mm de diâmetro.

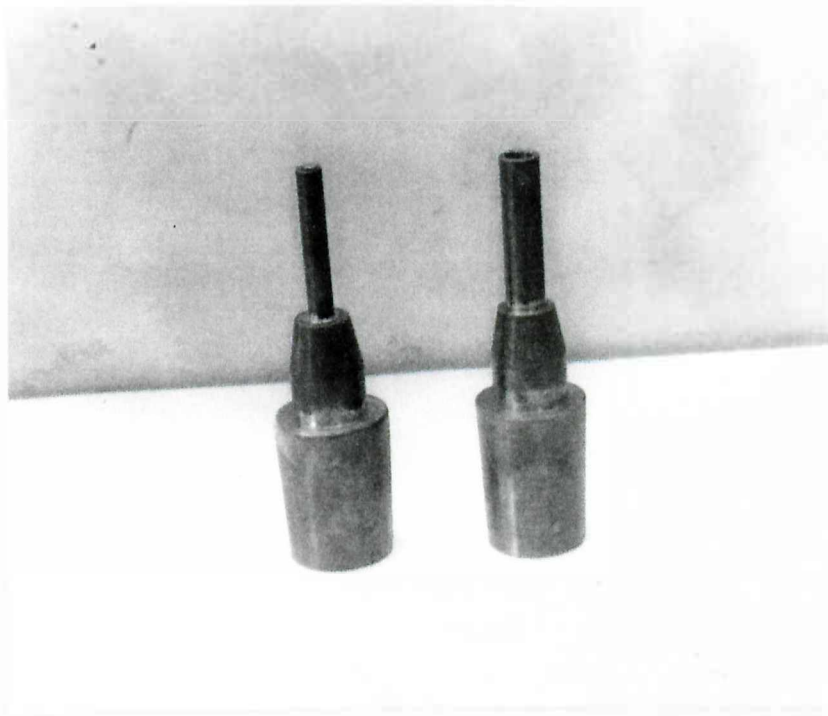


Figura 5.2: Ferramentas utilizadas nos pré-testes realizados no protótipo de usinagem eletroquímica.

Como as operações mais usadas na usinagem eletroquímica são a rebarbação e a furação, apenas essas 2 operações foram ensaiadas na verificação do desempenho do protótipo. A metodologia usada bem como os resultados encontrados em cada caso, encontram-se expostos a seguir.

### 5.1. - Rebarbação

A rebarbação foi feita em anéis de aço SC 3428 DIN 1629 de 10 mm de altura galvanizado com costura, seccionados por serramento em uma serra alternativa, conforme Figura 5.3.

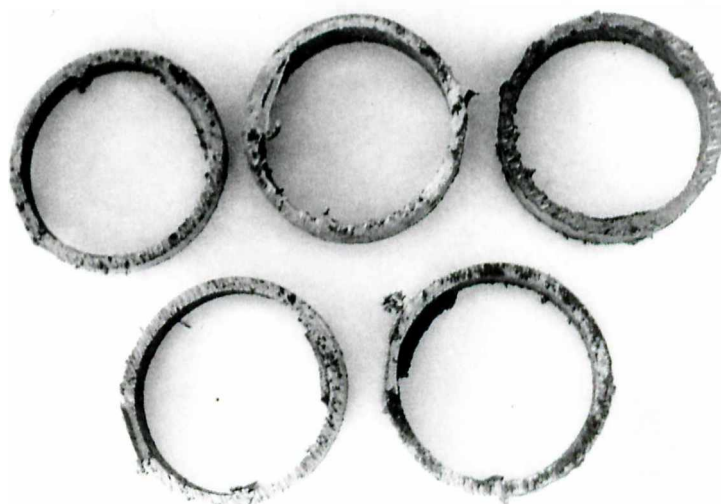


Figura 5.3: Anéis de aço galvanizado utilizados nos ensaios de rebarbação.

Na Figura 5.4 tem-se um esquema da montagem do par ferramenta-peça, e na Figura 5.5 uma vista da ferramenta, que, conforme o esquema, apresenta a forma de um disco cilíndrico com diâmetro externo maior que o diâmetro externo do anel a ser rebarbado.

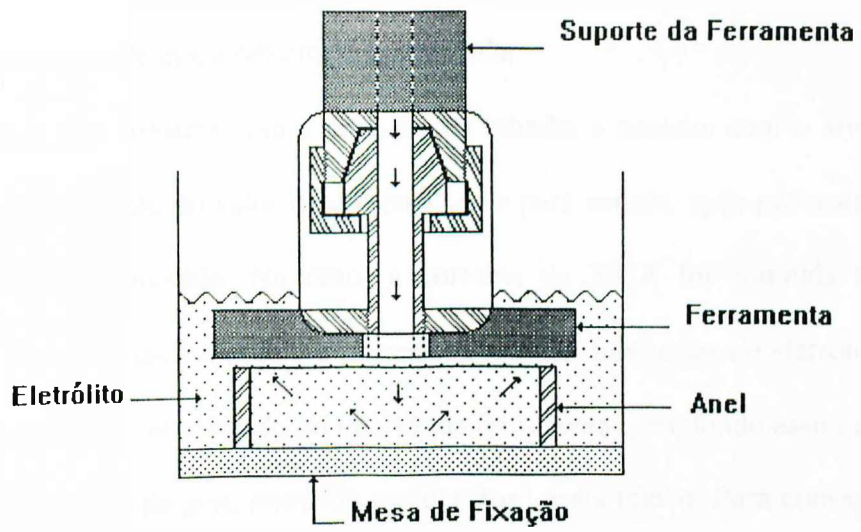


Figura 5.4: Esquema ilustrativo do ensaio de rebarbação.



Figura 5.5: Ferramenta utilizada nos ensaios de rebarbação.

Como se sabe (vide capítulo 3), nesta operação não há avanço do cabeçote. Deixa-se a usinagem prosseguir até que a rebarba seja removida.

Como o *gap* aumenta com a remoção da rebarba e também com o arredondamento dos cantos, a diminuição do valor da corrente serve para indicar, após pré-testes, o momento que a rebarba foi removida. No caso, a corrente de 80 A foi admitida como final de rebarbação. Nestes ensaios a peça e a ferramenta ficaram submersas no eletrólito que entrava na cuba através de um furo vazado no interior da ferramenta, permitindo assim um fluxo maior do eletrólito na região do *gap*, retirando os “detritos” desta região. Para começar a usinagem, a ferramenta era avançada até encostar na rebarba e logo depois afastada, deixando um *gap* aproximadamente igual a 0,5 mm.

Baseando-se em McGeough (1988), Benedict (1987) e Ajlouny e Gillespie (1978), foram empregados os seguintes parâmetros de usinagem: Tensão = 12 V; *gap* = 0,5 mm; Pressão = 0,2 kgf/cm<sup>2</sup> (~20 kPa); Vazão ≈ 750 l/h; eletrólito = solução aquosa de 30 % em peso de NaCl; ferramenta e peça sem recobrimento e eletrólito sem filtração.

O número de anéis usados, depois dos testes preliminares, foi em número de dez sendo que uma das faces de cada anel foi faceada e rebarbada por torneamento para que, com isso, cada anel pudesse ser melhor fixado à base e proporcionasse melhor paralelismo da face a ser rebarbada em relação à face plana da ferramenta. Para efeito deste ensaio considerou-se como rebarba não só as rebarbas de serramento propriamente ditas, como também as próprias marcas de serramento e o desvio de ortogonalidade da face serrada em relação ao eixo do anel.

Os resultados dos ensaios nos dez anéis utilizados estão sintetizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de rebarbação.

ANEL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CORRENTE	206	210	200	202	216	222	184	200	160	128
INICIAL (A)										
TEMPO DE REBARBAÇÃO (min)	4,67	4,77	4,58	4,38	4,54	4,18	5,08	4,58	5,40	6,20

Os cinco primeiros anéis foram rebarbados em seqüência sem filtragem. Entre o quinto e o sexto anel foi feita uma filtragem durante 15 minutos e os cinco anéis restantes foram rebarbados a seguir na seqüência da ordem numérica.

Como as rebarbas, além de bastante diferenciadas em tamanho, apresentavam diferentes formas e posições em relação ao plano médio das seções serradas, as correntes iniciais foram bastante divergentes em seus valores. Como em cada caso a rebarbação teve continuidade até abaixar o valor da corrente para 80 A, resultou diferentes valores para os tempos de rebarbação, com um desvio máximo de 1,36 sobre o valor médio de 4,84, ou seja, um desvio máximo de 28 % e um desvio padrão de aproximadamente 12 %.

Conforme se pode observar na Figura 5.6, além da perfeita rebarbação, eliminando-se inclusive as marcas de serramento, observou-se que os anéis diminuíram muito de espessura devido tanto à usinagem interna como externa do anel. Isto não só aumenta o tempo de rebarbação como pode prejudicar a qualidade da peça. Na prática são usados recobrimentos isolantes tanto nas laterais da ferramenta como nas partes da peça onde não se quer que a remoção de material aconteça. Como não foi empregado tal recobrimento, não há como comparar esses resultados com os encontrados por **Benedict (1987)**, **McGeough (1988)** e **SME (1984)**. Cita-se um caso de rebarbação de dentes de engrenagem apresentado por

**McGeough** (1974) onde irregularidades de 0,08 mm no perfil de engrenagens de 25 dentes foram retiradas em apenas 3 segundos, utilizando-se 12 V, 250 A e como eletrólito uma solução de  $\text{NaNO}_3$  a 30 % em água.



Figura 5.6: Anéis de aço após a rebarbação.

## 5.2. Furação Eletroquímica

Nos ensaios de furação eletroquímica em cheio foram utilizadas ferramentas de cobre eletrolítico revestida com tinta epoxi a fim de minimizar a passagem de corrente pelas laterais destas, conforme ilustra a Figura 5.7.



Figura 5.7: Ferramentas utilizadas nos ensaios de furação.



A tinta foi aplicada em três demãos: uma de fundo e duas de acabamento. Na demão de fundo foi utilizada a tinta Sumadur SP 530 da Sumaré Tintas que, de acordo com Gnecco (1994) é um primer epoxi-isocianato, bicomponente de cor vermelha, recomendado especialmente como primer de aderência sobre aço galvanizado ou superfícies metálicas não ferrosas, tais como: alumínio, cobre, chumbo e substratos não-metálicos como poliéster reforçado com fibra de vidro. Também pode ser aplicado sobre aço carbono, ferro fundido e aço inoxidável. Aceita uma variada gama de acabamentos destacando-se as tintas epoxis e poliuretânicas.

Nas demãos de acabamento utilizou-se a Sumastic 2000 da mesma empresa de tintas, que é uma tinta epoxi-alcatrão. Aplicada em duas demãos proporciona alta resistência a ambientes úmidos ou quando exposto a ambiente altamente agressivo. Por isso, julgou-se que esta ofereceria a proteção adequada à agressividade proporcionada pelo jato eletrolítico. Após a pintura, a ferramenta apresentou 5,61 mm de diâmetro externo.

A ferramenta utilizada era vazada, com diâmetro interno igual a 2,5 mm, para possibilitar a passagem do jato eletrolítico pelo seu interior.

O corpo de prova utilizado nos ensaios de furação, conforme Figura 5.8, foi uma barra de aço rápido (9,53 x 9,53 x 127 mm) classe 622 (AISI T6), com os seguintes componentes: C: 0,75 - 0,85%; Mn: 0,10 - 0,40%; Si: 0,10 - 0,40%; Cr: 4,00 - 4,50%; V: 1,60 - 2,00%; W: 18,75 - 20,50%; Mo: 0,60 - 0,80% e Co: 12%. Foram feitos 6 furos vazados, sendo que a cada furo a peça era pesada para o cálculo da taxa de remoção de material. Um dos furos foi feito com uma ferramenta sem recobrimento.

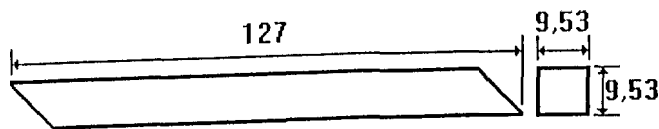


Figura 5.8: Vistas da barra de aço rápido utilizado nos ensaios de furação.

Nos ensaios de furação além da taxa de remoção de material foram medidos também o sobre-corte lateral e a conicidade do furo. Para finalizar, foi feito um corte em um dos furos para a análise da ordem de grandeza da rugosidade superficial.

Para avaliação da conicidade, conforme Figura 5.9, foram tomadas 5 medidas dos diâmetro  $D_1$  e  $D_2$  nas duas extremidades dos furos. Os valores da conicidade foram obtidos através da Expressão 5.1.

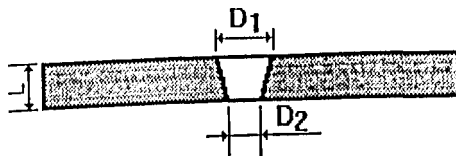


Figura 5.9: Vista esquemática da barra de aço rápido após a furação.

$$\text{Conicidade} = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot L} \quad (5.1)$$

onde:

$$D_1 \text{ é o diâmetro na entrada do furo} = \sum_{i=1}^5 \frac{D_{1i}}{5};$$

$$D_2 \text{ é o diâmetro na saída do furo} = \sum_{i=1}^5 \frac{D_{2i}}{5};$$

$L$  é a espessura da barra de aço rápido = 9,53 mm.

O sobre-corte lateral foi medido nas duas extremidades do furo, sendo que em cada extremidade foi feita a média das medidas de cinco pontos diferentes. As equações utilizadas para os cálculos do sobre-corte lateral estão mostradas nas Expressões 5.2 e 5.3.

$$SL_{\text{entrada}} = \frac{D_1 - D_{\text{ferram.}}}{2} \quad (5.2)$$

$$SL_{\text{saida}} = \frac{D_2 - D_{\text{ferram.}}}{2} \quad (5.3)$$

onde  $D_{\text{ferram.}}$  é o diâmetro da ferramenta igual a 5,61 mm.

Para fazer as medições dos diâmetros dos furos foi utilizado um metroscópio com resolução de 0,1  $\mu\text{m}$ . As medidas foram tomadas utilizando um apalpador esférico que era encostado na parede do furo e deslocado até a outra extremidade, sendo o valor do diâmetro a distância percorrida pelo apalpador menos o diâmetro da esfera.

Nas medições da rugosidade das superfícies laterais do furo foi utilizado um Rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest 211. As medições foram realizadas em 5 regiões diferentes na parede lateral do furo, com um *cut-off* igual a 0,8 mm.

Os principais parâmetros utilizados nos ensaios de furação foram: Tensão = 12 V; Eletrólito de NaCl a 30 %; Pressão do eletrólito = 1,5  $\text{kgf/cm}^2$  ( $\approx$  0,15 MPa); Vazão do Eletrólito = 200 l/h; Velocidade de avanço do cabeçote = 0,5 mm/min e valor do *gap* = 0,3 mm.

O avanço de 0,5 mm/min foi mantido até o vazamento do eletrólito pela extremidade inferior da barra de aço rápido, sendo que a partir deste momento a velocidade era reduzida

para 0,25 mm/min para evitar que a ferramenta tocasse a peça e provocasse curto circuito. Depois da velocidade ser reduzida usinou-se, ainda, por 2 minutos. Este tempo foi selecionado nos testes preliminares, para permitir uma furação completa e sem rebarbas na parte inferior do furo.

Os principais resultados obtidos acham-se resumidos na Tabela 5.2. A Figura 5.10 mostra uma fotografia da barra de aço rápido após a usinagem.

Tabela 5.2: Resultados dos Ensaio de Furação.

FURO	1	2	3	4	5	6
TEMPO (min)	22,67	22,50	21,90	20,22	23,00	22,50
CORRENTE (A)	13	12	15	22	12	12
DENSIDADE DE CORRENTE (A/mm <sup>2</sup> )	0,88	0,81	1,02	1,50	0,81	0,81
MASSA ERODIDA (g)	3,20	3,01	3,99	5,45	3,36	3,10
TRM (mm <sup>3</sup> /min A)	1,38	1,42	1,55	1,57	1,55	1,46
SL <sub>entrada</sub> (mm)	0,66	0,71	1,21	1,95	0,54	0,58
SL <sub>saida</sub> (mm)	0,74	0,44	-	0,3	0,40	0,57
CONICIDADE (%)	0,81	0,98	-	17,30	1,46	0,10

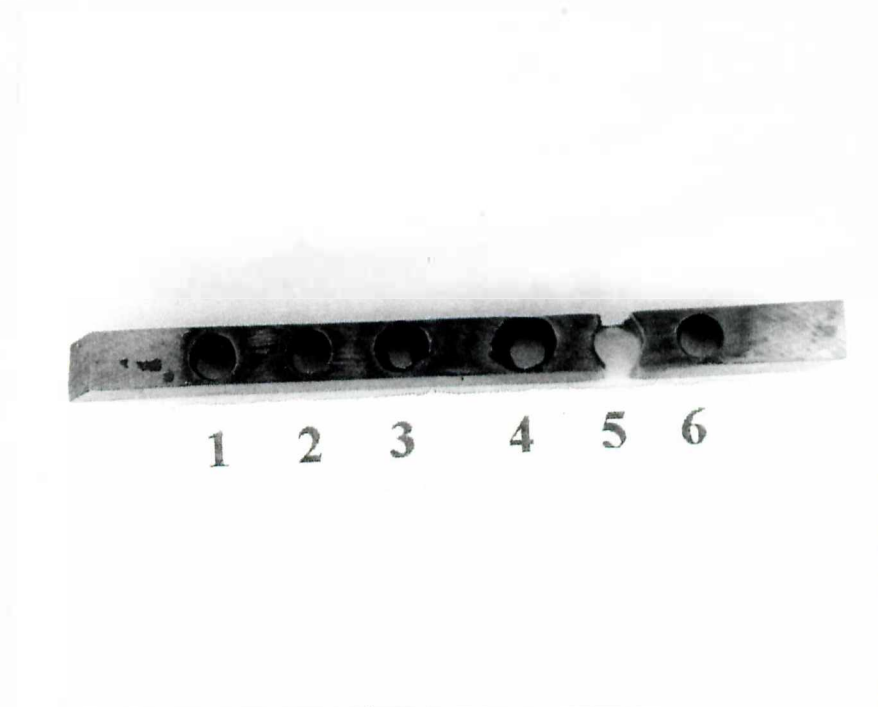


Figura 5.10: Foto do *bits* de aço rápido após a usinagem.

Observando-se na Tabela 5.2 os valores encontrados para a taxa de remoção de material, pode-se calcular uma média de  $1,45 \text{ mm}^3/\text{min A}$ . **McGeough** (1988) e **Metals Handbook** (1989) apresentam valores teóricos em torno de  $1,50 \text{ mm}^3/\text{min A}$  para o Ferro com valência 3. No caso do Ferro 2, estes mesmos autores mostram valores teóricos em torno de  $2,10 \text{ mm}^3/\text{min A}$ . Os resultados obtidos nos ensaios experimentais estiveram próximos dos valores para o Ferro 3 devido a limitação da filtragem do circuito eletrolítico. Como não ocorre filtragem durante a usinagem, existe tempo suficiente para ocorrer a reação da Equação 2.7, ou seja, a precipitação do hidróxido de Ferro 3. Isso pôde ser constatado também pela coloração marrom do eletrólito durante a usinagem.

Se a taxa de remoção de material encontrada está próxima dos valores encontrados por pesquisadores, a corrente, e portanto a densidade de corrente usada foi bem abaixo da atualmente utilizada nas pesquisas e na indústria pois, como relata **Benedict (1987)**, furos de 5 mm de diâmetro são normalmente furados com cerca de 100 A e não com cerca de 12 A como nos ensaios em questão. Isto se deu por causa da falta de potência da fonte utilizada. Com fontes mais potentes, tais furos poderiam ser feitos com 100 A ou mais reduzindo o tempo de furação a cerca de 2 a 3 minutos.

Como pode ser observado também nos resultados da Tabela 5.2, os valores do sobre-corte lateral e da conicidade para os furos 3 e 4 são bem distintos do restante, conforme mostrado na Figura 5.10. No caso do furo 3, ocorreu um pequeno curto circuito entre a ferramenta e a peça no final do ensaio, com isso não foi possível fazer a medição do sobre-corte lateral na saída e da conicidade. Isso comprova os efeitos prejudiciais causados por um curto circuito. Além dos danos causados na peça, danificou-se a ferramenta que foi substituída. No furo 4 foi utilizada uma ferramenta sem recobrimento, o que provocou a passagem de corrente pelas laterais da ferramenta, arrancando mais material das paredes do furo aumentando os desvios nos valores da conicidade e sobre-corte lateral.

Na análise do sobre-corte lateral tem-se valores variando de 0,40 a 0,74 mm. A literatura, por exemplo **Metals Handbook (1989)**, apresenta valores em torno de 0,25 mm para o sobre-corte lateral para a operação de furação em furos com diâmetros menores que 10 mm, utilizando ferramenta revestida e eletrólito de  $\text{NaNO}_3$  a 30%. O que explica tal diferença no sobre corte lateral, além do eletrólito, é o maior tempo de usinagem utilizado nos ensaios com o protótipo em comparação com os da literatura. Com mais tempo, a usinagem lateral,

que é indesejável, se torna maior visto que, mesmo com a ferramenta recoberta, o eletrólito ionizado proporciona reações laterais com a peça por maior tempo.

Os valores encontrados na literatura para a conicidade é de aproximadamente 0,10 %. Este valor difere dos resultados obtidos na maioria dos furos. Como já foi mencionado anteriormente, o tempo de usinagem sendo longo ocorre maior arrancamento de material da lateral do furo no início da usinagem, ou seja, na entrada do furo, produzindo grandes desvios em termos de conicidade. Além de utilizar uma fonte que forneça maior potência ao equipamento, uma outra solução de projeto seria bombear o jato eletrolítico por fora da ferramenta e succioná-lo pelo seu interior. Deste modo, o eletrólito passaria pela lateral do furo sem estar ionizado.

A fim de observar-se a ordem de grandeza da rugosidade foi feito um corte em um dos furos. O valor da rugosidade média encontrado foi 2,92  $\mu\text{m}$ . **Benedict (1987)**, **McGeough (1988)** e **Metals Handbook (1989)** apresentam valores para a rugosidade na faixa de 0,3 a 1,9  $\mu\text{m}$ , na superfície principal que está sendo usinada, e de até 5  $\mu\text{m}$  para as superfícies laterais de furos, sendo que estes últimos valores dependem diretamente da pressão e da vazão do eletrólito.

## 6 - CONCLUSÕES

Os resultados com rebarbação e furação mostraram, no entanto, que o equipamento pode ser usado sem grandes exigências de desempenho para rebarbar e furar peças condutoras de altíssima dureza (como é o caso do aço rápido). Este já é um bom resultado pois constantemente pesquisadores deparam-se com a necessidade de usinar materiais de difícil usinagem. A alternativa do processo de usinagem por eletroerosão nem sempre satisfaz, nesses casos, por causa das alterações microestruturais que provoca na superfície usinada com a chamada "zona afetada pelo calor".

Um inconveniente do protótipo foi o sistema de filtragem onde, além da filtragem não ser feita simultaneamente à usinagem, também não foi obtida grande performance com o hidrociclone e com o filtro de elementos porosos. Este sistema não é indicado para um equipamento que trabalha em grande escala, pois, os cartuchos do filtro mais fino saturam rapidamente. Um novo sistema de limpeza deve ser pesquisado, começando por um estudo minucioso das partículas formadas durante a usinagem.

Os resultados obtidos nos ensaios mostraram-se em geral inferiores aos valores teóricos previstos para o processo e aos índices alcançados por outros pesquisadores e em aplicações industriais, principalmente por causa da fonte de potência utilizada no protótipo.

As fontes atualmente empregadas em equipamentos de alto desempenho requerem, como assinalado no capítulo 3, fontes de 5 a 30 V e correntes de 2 000, 10 000 até 40 000 ampères normalmente tiristorizadas, contrastando bastante com a fonte de 12 ou 24 V e corrente máxima de 400 A parcialmente retificada usada no protótipo. Além de tempos muito maiores de usinagem verificados, por exemplo, na rebarbação, essa demora acarreta desvios



muito maiores que os verificados em aplicações industriais específicas. Enquanto furos de 5 mm de diâmetro tiveram 0,60 mm de sobre-corte lateral e 0,4 % de conicidade, a literatura registra respectivamente, 0,25 e 0,1% para casos similares.

Além da baixa potência e qualidade da fonte empregada, outros fatores contribuíram também com as discrepâncias verificadas em relação aos resultados otimizados pela indústria: a não utilização de recobrimentos isolantes que melhoram não só a taxa de remoção de material mas principalmente a acuracidade no caso da rebarbação, a utilização apenas de solução de NaCl como eletrólito, quando se sabe que a solução de  $\text{NaNO}_3$  é mais adequado em várias situações, em especial para rebarbação e furação de pequenos furos, conforme apresentado na capítulo 2 (Figura 2.6), e a falta de um sistema de filtração mais eficiente que purifica o eletrólito durante o processo. Conforme está nos capítulos 4 e 5, o sistema utilizado no protótipo faz a filtração em separado, após a usinagem.

A principal conclusão do trabalho é que o protótipo construído mostrou-se útil como ponto de partida para a pesquisa em usinagem eletroquímica no Laboratório de Usinagem Não Tradicional, uma vez que apresenta uma cuba eletrolítica funcional e um sistema de avanço constante de bom desempenho. Serviu de aprendizado sobre o processo e, se otimizado, poderá se tornar muito útil à pesquisa de ponta sobre o processo. Uma melhoria imediata será a incorporação de uma fonte trifásica, tiristorizada recém-chegada neste Laboratório. Esta fonte apresenta as seguintes características: Potência = 50 kW; Tensão de 5 a 25 V e Corrente Máxima = 2 000 A.

As principais sugestões para trabalhos futuros em usinagem eletroquímica no Laboratório acham-se relacionadas a seguir, agrupadas em duas linhas básicas: otimização do protótipo e pesquisa de parâmetros. Na otimização do protótipo sugere-se incorporar ao

protótipo atual a fonte acima citada, um servocontrole para o mecanismo de avanço para a manutenção do *gap* constante, um sistema de limpeza do eletrólito mais eficiente que funcione simultaneamente à usinagem e a incorporação de uma mesa de coordenadas com comando CNC.

Na linha de pesquisa de parâmetros, sugere-se pesquisar a acuracidade de furos em altos níveis de densidade de corrente, utilizando soluções de  $\text{NaNO}_3$  e  $\text{NaCl}$  como eletrólito e recobrimento isolante de diferentes naturezas como recobrimentos cerâmicos.

Como o ponto forte do processo é a integridade superficial, sugere-se comparar parâmetros como rugosidade superficial, microtrincas superficiais e alterações microestruturais em diferentes materiais de alta dureza como aço-rápido, superligas e carbonetos condutores com os obtidos por outros processos concorrentes como Eletroerosão e Ultrassom.

**7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AJLOUNY, N.S. e GILLESPIE, L.K. (1978);** *State of the Art of General Deburring Methods*, The Bendix Corporation.
- ANDRADE, F.C. e CRUZ, C. (1993);** *Desenvolvimento de uma Unidade de Usinagem Eletroquímica (2ª Etapa)*, Relatório Técnico, UFU, 15 pgs.
- ANDRADE, F.C., CRUZ, C. e MALAQUIAS, E. (1995);** *Desenvolvimento de uma Unidade de Usinagem Eletroquímica (3ª Etapa)*, Relatório Técnico, UFU, 21 pgs.
- BENEDICT, G.F. (1987);** *Nontraditional Manufacturing Processes*, New York, Marcel Dekker.
- 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. e MARIANI, L.F. (1996);** *Otimização do Circuito Eletrolítico para um Protótipo de Usinagem Eletroquímica*, Recife, IV Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, pgs 249-253.
- CRUZ, C., MALAQUIAS, E. e ANDRADE, F.C. (1995);** *Desenvolvimento do Mecanismo de Avanço do Cabeçote em um Protótipo de Usinagem Eletroquímica*, Campo Grande, 4º Encontro de Iniciação Científica.
- DELMÉE, G.J. (1983);** *Manual de Medição de Vazão*, São Paulo, Ed. Blucher.
- FELTRE, R. (1994);** *Química Geral*, 4ª Edição, São Paulo, Editora Moderna, vol. 1.

- FIELD, M. e KAHLES, J.F. (1982);** *Review of Surface Integrity of Machined Components*, Metcut Research Assoc., Cincinnati, OH.
- GNECCO, C. (1994);** *Pintura de Manutenção Industrial*, São Paulo, Publicação no Instituto de Pesquisas Tecnológicas Nº 1558, São Paulo.
- KOZAK, J. et al (1995);** *Computer Simulation of Numerically Controlled Electrochemical Machining with a Spherical Tool Electrode*, 11th International Conference on Computer-Aided Production Engineering, London.
- MARTY, C. (1971);** *Usinages Par Procédés Non Convencionnels*, Masson, Paris.
- MCGEOUGH, J.A. (1974);** *Principles of Electrochemical Machining*, Chapman and Hall, London.
- MCGEOUGH, J.A. (1988);** *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall, London.
- METAL'S HANDBOOK (1989);** *Nontraditional Machining*, Nona Edição, Volume 16.
- PANDEY, P.C. e SHAN, H.S. (1985);** *Modern Machining Processes*, Tata McGraw Hill, New Delhi.
- POSTAL, M., CRUZ, C. (1993);** *Circuito Eletrolítico de uma Unidade de Usinagem Eletroquímica (2ª Etapa)*, Relatório Técnico, UFU.
- POSTAL, M., MALAQUIAS, E. e CRUZ, C. (1995);** *Desenvolvimento de um Circuito Eletrolítico para um Protótipo de Usinagem Eletroquímica*, Campo Grande, 4º Encontro de Iniciação Científica.
- RAPID POWER (1994);** *Manufacturing Powers Supplies*, Catálogo, Brookfield, USA.

**RUMYANTSEV, E. e DAVYDOV, A. (1989);** *Electrochemical Machining of Metals*, Mir Publishers, Moscow.

**SAUSHKIN, B. et al (1995);** *Finish Electrochemical Machining of the Large-Scale Punches for Hot Die Forging*, International Symposium for Electromachining, Lausanne, pgs 603-609.

**SME - Society Manufacturing Engineers (1984);** *Nontraditional Machining Processes*, Second Edition, Dearborn.

**SNOEYS, R. et al (1986);** *Current Trends in Non Conventional Material Removal Processes*, CIRP Annals, Vol. 35/2.

**SVAROVSKY, L. (1981);** *Solid-Liquid Separation*, Second Edition, Butterwoths.

**SVAROVSKY, L. (1984);** *Hydrocyclones*, Technomic Publishing Co.

**WATANABE, O.Y., PACHECO, R.P. e CRUZ, C. (1991);** *Montagem de uma Unidade de Usinagem Eletroquímica*, Relatório Técnico, UFU.