

000  
3219  
P8811  
TCS/Mea

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FERRAMENTAL NA  
ACURACIDADE DE FORMA DE PEÇAS DE AÇO ABNT  
M2, OBTIDAS POR USINAGEM ELETROQUÍMICA”**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

**Mário César Pelizer**

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

**DIRBI/UFU**



1000186984

Banca Examinadora:

- |   |                    |
|---|--------------------|
| <b>Prof. Dr. Claudionor Cruz</b>              | - (UFU) Orientador |
| <b>Prof. Dr. Luiz Alfredo Pavanin</b>         | - (UFU)            |
| <b>Prof. Dr. Walter Lindolfo Weingaertner</b> | - (UFSC)           |

Uberlândia, 22 de agosto de 1997.

**À minha esposa Leila,  
aos meus filhos Ludmila,  
René e Breno pelo apoio e  
incentivo recebido.  
Aos meus pais Gino e Wilma,  
e minha irmã Patrícia pelo  
carinho que recebi.**

**Ao meu Senhor, por todas as  
Graças recebidas nesta vida.**

## AGRADECIMENTOS

- Ao professor Claudionor Cruz pela orientação e dedicação;
- Ao Laboratório de Usinagem Não Tradicional, Departamento de Mecânica e à Coordenação do Curso de Pós-Graduação, pela oportunidade de realizar este trabalho;
- Aos técnicos do DEEME, particularmente ao Geraldino Martins e Reginaldo Ferreira de Souza, pela contribuição no decorrer do trabalho;
- Aos colegas e colaboradores de iniciação científica Cristiano Ubirajara de Faria, Herik Mauerberg, pelo auxílio durante os testes experimentais;
- A todos colegas contemporâneos de curso, pela amizade e companheirismo;
- Aos sempre amigos e colegas professores Orosimbo de Almeida Rego e Edson Pereira Parreira, pelo incentivo e principalmente pela amizade;
- A CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro;
- A todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, embora não explicitamente mencionados, mas sempre lembrados;
- A todos enfim, o mais precioso desta vida, *amizade e gratidão*.

**“ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FERRAMENTAL NA ACURACIDADE DE  
FORMA DE PEÇAS DE AÇO ABNT M2, OBTIDAS POR USINAGEM  
ELETROQUÍMICA”**

**SUMÁRIO**

|  | Página |
|--|--------|
| RESUMO   | VI     |
| ABSTRACT   | VII    |
| LISTA DE FIGURAS   | VIII   |
| LISTA DE TABELAS   | IX     |
| LISTA DE SÍMBOLOS  | X      |
| <br>   |        |
| 1- INTRODUÇÃO  | 1      |
| <br>   |        |
| 2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PROCESSO DE<br>USINAGEM ELETROQUÍMICA | 4      |
| 2.1- Generalidades   | 4      |
| 2.2 - Principais Elementos do Processo                                 | 10     |
| 2.3 - Dissolução Anódica   | 15     |
| 2.4 - Reações Catódicas  | 24     |
| 2.5 - Parâmetros do Processo   | 25     |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3 -   | FATORES INTERVENIENTES NA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL (TRM) E ACURACIDADE DE FORMA | 28 |
| 3.1 - | A Taxa de Remoção de Material  | 29 |
| 3.2 - | A Acuracidade de Forma   | 34 |
| 4 -   | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL  | 40 |
| 4.1 - | A Peça a Ser Usinada   | 44 |
| 4.2 - | A Máquina Eletroquímica Utilizada  | 46 |
| 4.3 - | Parâmetros Utilizados nos Ensaios  | 50 |
| 4.4 - | Ferramentais Utilizados  | 51 |
| 5 -   | RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS  | 61 |
| 5.1 - | Melhores Resultados Obtidos para com a Acuracidade de Forma                        | 61 |
| 5.2 - | Resultados Obtidos com o Ferramental nº 1  | 64 |
| 5.3 - | Resultados Obtidos com o Ferramental nº 2  | 66 |
| 5.4 - | Resultados dos Testes Preliminares   | 66 |
| 6 -   | CONCLUSÕES   | 71 |
| 7 -   | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 74 |
| 8 -   | ANEXOS   |    |

**PELIZER, M.C.; Estudo da influência do ferramental na acuracidade de forma de peças de aço ABNT M2, obtidas por usinagem eletroquímica, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia - MG, 1997, 80 pgs.**

**Resumo:** Neste trabalho foram estudados os aspectos que mais influenciam a acuracidade de forma, na usinagem eletroquímica de barras de aço rápido ao Molibidênio ABNT M2. Com ênfase no projeto do ferramental, três projetos de ferramentais foram desenvolvidos e testados na usinagem das peças, os quais se basearam em duas concepções quanto a direção de avanço da ferramenta com vistas a um entalhe circular usinado na barra. O equipamento utilizado foi desenvolvido no Laboratório de Usinagem Não Tradicional do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, o qual está equipado com uma fonte de potência tirestorizada de 50 kVA de corrente pulsada. A acuracidade de forma foi avaliada por análise visual por comparação com uma peça padrão produzida pelo processo de eletroerosão, e os melhores resultados tiveram seus desvios de forma medidos em projetor de perfil contra um cilindro padrão. O trabalho permitiu concluir sobre a necessidade de usinar em câmara fechada com controle de pressão do eletrólito, assim como a necessidade do equipamento de usinagem ser equipado com sistema de controle do “gap”, fatores estes decisivos na obtenção de uma boa acuracidade de forma. Conclui-se também sobre a melhor adequação dos eletrólitos à base de  $\text{NaNO}_3$  na usinagem do aço rápido ABNT M2, quando comparados os resultados obtidos na usinagem com eletrólitos à base de  $\text{NaCl}$ .

### ***Palavras-chaves***

Usinagem Eletroquímica; Acuracidade ; Ferramental; Aço ABNT M2.

**PELIZER, M.C.; Study of tooling design influence on shape accuracy of ABNT M2 steel parts electrochemically machined**, Msc Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brazil, 1997, 80 pgs.

**Abstract:** Shape accuracy was investigated in respect to electrochemical tooling influence on machining of a round groove in speed steel ABNT M2 bars. Three designs were developed based on conceptions regarding tool movement direction. On first conception tool moves perpendicularly to groove longitudinal axis, and in the second tool moves paralelly to the groove axis. The electrochemical equipment was developed in the Laboratório de Usinagem Não Tradicional do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. The equipment is equipped with a tyrestorized pulsed power source of 50 kWA. Shape accuracy was visually evaluated by comparation to a master grooved bar, which was machined by electrical discharge process. The best piece parts were messured to shape runout on a profile machine against a cylinder standard gauge. The most important conclusions obtained from this study are: electrochemical machining must be performed in closed chamber to allow eletrolite pressure control, sodium nitrate is more adequate to machine ABNT M2 steel than sodium chloride and machining equipment must be equipped with a monitorized gap control system to achive good shape accuracy levels.

***Keywords***

Electrochemical Machining; Accuracy; Tooling; ABNT M2 Steel

## LISTA DE FIGURAS

| <b>Figuras</b>  | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| 2.1 - Usinagens Típicas Obtidas em ECM  | 6             |
| 2.2 - Esquema Básico de um Equipamento ECM  | 7             |
| 2.3 - Curvas de Polarização Anódica   | 16            |
| 2.4 - Curva de Eficiência da Corrente   | 21            |
| 3.1- Fatores Intervenientes na Acuracidade de Forma                                       | 35            |
| 4.1- Fluxograma Representativo da Metodologia Utilizada                                   | 41            |
| 4.2 - Esquema de Usinagem com Avanço da Ferramenta<br>Paralelo a Geratriz do Entalhe      | 42            |
| 4.3 - Esquema de Usinagem com Avanço da Ferramenta<br>Perpendicular a Geratriz do Entalhe | 42            |
| 4.4 - Esquema da Avaliação Quantitativa da Acuracidade de<br>Forma                        | 44            |
| 4.5 - Configuração da Geometria da Peça Usinada   | 45            |
| 4.6 - Padrão de Geometria Adotado   | 45            |
| 4.7 - Vista Geral do Equipamento de ECM, no Início do<br>Trabalho                         | 46            |
| 4.8 - Vista do Equipamento de ECM Após Implementação<br>da Melhorias                      | 47            |
| 4.9 - Fonte de Potência de 50kWA  | 48            |
| 4.10 - Característica da Onda Pulsada para Tensão de 15V                                  | 49            |



|  |    |
|--|----|
| 4.11 - Conjunto do Ferramental nº 1 montado na cuba                                  | 52 |
| 4.12 - Ferramenta de Cobre com Revestimento de PVC                                   | 53 |
| 4.13 - Ferramenta de Inox ABNT 304   | 53 |
| 4.14 - Detalhe da Usinagem em Câmara Fechada   | 54 |
| 4.15 - Conjunto do Ferramental nº 2  | 55 |
| 4.16- Detalhe da Câmara de Usinagem  | 56 |
| 4.17 - Três Ferramentas Testadas com o Ferramental nº 2                              | 57 |
| 4.18 - Perfil da Ferramenta de Cobre com Raio de Ponta Variável                      | 57 |
| 4.19 - Ferramenta de Usinagem em Câmara Aberta                                       | 59 |
| 5.1 - Peças Usinadas com $\text{NaNaO}_3$  | 61 |
| 5.2 - Melhores Resultados com peças usinadas   | 62 |
| 5.3 - Comparação Visual de Um Entalhe Usinado com $\text{NaCl}$<br>com a peça padrão | 64 |
| 5.4 - Peças com Usinagem Não Concluída   | 65 |
| 5.5 - Peça Usinada com Ferramenta de Cobre Revestida                                 | 65 |
| 5.6 - Peça Usinada em Câmara Aberta  | 67 |
| 5.7 - Peça Unicada em Câmara Aberta  | 68 |
| 5.8 - Peças Usinadas em Câmara Aberta  | 68 |
| 5.9 - Ferramentas Utilizadas nos Testes Preliminares                                 | 69 |

### LISTA DE TABELAS

| <b>Tabela</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| 2.1 - Propriedades dos Eletrólitos $\text{NaCl}$ , $\text{NaNO}_3$ e $\text{NaClO}_3$ | 12            |
| 4.1 - Parâmetros Utilizados nos Ensaios   | 51            |

**LISTA DE SÍMBOLOS**

- a - distância ferramenta-peça “gap” (mm)
- A - peso atômico
- d - massa específica ( $\text{Kg/m}^3$ )
- f - medida do desvio de forma (mm)
- E - equivalente eletroquímico ( $\text{g/mol.C}$ )
- $E_a$  - potencial anódico (V)
- ECM - “Eletrochemical Machining”
- $E_g$  - potencial de evolução do oxigênio (V)
- $E_k$  - potencial catódico (V)
- $E_{ss}$  - potencial eletrolítico (V)
- F - constante de Faraday (96.487 C)
- I - intensidade de corrente (A)
- J** - densidade de corrente ( $\text{A/cm}^2$ )
- $J_{\text{lim } 1}$  - densidade de corrente limite para NaCl ( $\text{A/cm}^2$ )
- $J_{\text{lim } 2}$  - densidade de corrente limite para  $\text{NaNO}_3$  ( $\text{A/cm}^2$ )
- $m_i$  - massa do elemento dissociado (g)
- $n_i$  - fração do elemento dissociado
- Q - carga elétrica ( C)
- $Q_p$  - carga elétrica por pulso ( C)

S - área da projeção ortogonal da superfície ( $\text{cm}^2$ )

TRM - taxa de remoção de material (g)

V - tensão da fonte (v)

z - valência

$\eta$  - eficiência de corrente (%)

$\rho$  - resistividade elétrica ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )

$\Delta t$  - intervalo de tempo (s)

$\Delta V$  - volume material dissociado ( $\text{mm}^3$ )

## 1- INTRODUÇÃO

De todos os processos de usinagem considerados não tradicionais, um dos mais promissores é sem dúvida a Usinagem Eletroquímica, a seguir designada simplesmente por ECM, em alusão à sigla inglesa internacionalmente conhecida do termo “Electrochemical Machining”.

A tecnologia eletroquímica aplicada à usinagem tem aproximadamente 30 anos. Os países do Leste Europeu foram precursores no estudo da ECM ( início por volta de 1920, conforme **Rumyantsev & Davydov[1989]**, embora sua primeira patente, requerida então por Gussef, data de 1929. Ainda na década de 1950, este processo começou a ser investigado na usinagem de materiais de alta resistência, que apareceram após a 2a. Guerra Mundial [**McGeough, 1988**]. Por outro lado, os países ocidentais utilizam relativamente pouco o processo, principalmente pelo fato de sua tecnologia ser quase desconhecida do grande público.

A partir de 1980, a ECM experimentou novo avanço e hoje vem ocupando lugar de destaque na indústria automotiva, naval, de materiais médico-hospitalar e principalmente na indústria aeroespacial . A usinagem de palhetas de turbinas a gás é provavelmente sua aplicação mais expressiva [**Risko,1990**]. Este “status” de processo “nobre” deve-se ao fato de que a usinagem ECM se caracteriza pela alta qualidade de superfície usinada, graças ao fato de ser um processo frio cujo mecanismo de remoção de material, a ser descrito no capítulo 2, muito beneficia a integridade superficial, deixando-a livre de tensões e microtrincas.

Ao contrário dos processos de usinagem tradicionais que utilizam de um contato físico entre ferramenta e peça e baseiam-se no princípio do cisalhamento e no princípio da abrasão, na ECM a remoção de material se dá átomo a átomo por um processo de

dissolução anódica, onde as dimensões e a forma são transferidas ou reproduzidas para a peça pelo eletrodo ferramenta [Cruz, 1995]. Se por um lado pode-se conseguir altas taxas de remoção e bom acabamento, por outro lado, o processo é muito limitado quando as possibilidades de obtenção de grandes níveis de acuracidade de forma. Isto justifica, em grande parte, o fato do processo ser ainda tão pouco difundido, só sendo usado em casos onde os outros fracassam totalmente [Benedict, 1987].

Objetivando altas acuracidades de forma, o emprego da usinagem eletroquímica, como processo de fabricação em escala industrial, requer o perfeito conhecimento dos fenômenos pertinentes ao processo assim como o domínio da tecnologia de projeto do ferramental e escolha dos parâmetros de usinagem. Tendo em vista que o problema crucial do processo é a obtenção de peças de formas precisas, este trabalho se ocupa, primordialmente, em contribuir com o tema. Como a acuracidade de forma é altamente dependente do ferramental, este trabalho enfoca justamente este ângulo do problema: realizar um estudo experimental com vistas à influência do ferramental, bem como de parâmetros do processo na acuracidade de forma na usinagem de um aço de alta dureza e resistência. Faz-se necessário esclarecer que por ferramental entende-se ser o conjunto composto do eletrodo ferramenta, (doravante denominado por ferramenta), mais a câmara e ou demais dispositivos usados para viabilizar os testes.

Outro objetivo implícito do trabalho foi o treinamento com o processo procurando descobrir na prática, à luz da teoria existente, alguns detalhes e vicissitudes não divulgadas na literatura oficial. Sabe-se que muitos desses detalhes já são de conhecimento das poucas empresas da antiga União Soviética, alemãs e americanas, não disponíveis ao grande público por interesses estratégicos das mesmas.

Quando uma empresa dessas vende um equipamento ao usuário (normalmente um equipamento complexo e de alto custo que muitas vezes ultrapassa a cifra de 1 milhão de dólares), ela vende o pacote tecnológico completo para a realização, quase sempre é, de um trabalho específico. Neste pacote estão incluídos não só o equipamento em si com o “design” específico, mas também o próprio ferramental, os parâmetros de corte e todo o “know-how” desenvolvido para aquela aplicação.

Para atender aos objetivos, a redação deste trabalho está assim dividida. No Capítulo 2 é feita uma abordagem genérica sobre o processo de Usinagem Eletroquímica. Nessa abordagem são considerados entre outros aspectos gerais, as reações anódicas e catódicas; as primeiras, responsáveis então pela remoção de material e a acuracidade da peça. É oportuno registrar aqui que o equipamento ECM usado no trabalho, desenvolvido no próprio laboratório NOTlab do **Departamento de Engenharia Mecânica da UFU**, conforme **Malaquias[1996]**, teve que sofrer vários melhoramentos feitos com a participação do autor, para que pudesse servir adequadamente aos objetivos deste trabalho. Esses melhoramentos feitos constam também do capítulo 4.

No capítulo 3 trata-se dos fatores que mais influenciam na taxa de remoção e na acuracidade de forma da peça. Decidiu-se pela redação deste capítulo específico porque, em ECM, a acuracidade de forma está muito ligada à taxa de remoção, sendo notável o fato de talvez ser o único processo básico de usinagem onde a acuracidade (bem como o acabamento, diga-se de passagem), melhora com o aumento da taxa de remoção.

Os procedimentos experimentais estão relatados no capítulo 4. O capítulo 5 resume e analisa os principais resultados encontrados, cujas conclusões, apresentadas no capítulo 6, incluem algumas sugestões de trabalhos cujas realizações seriam muito úteis ao conhecimento público sobre o processo.

## 2- CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

Neste capítulo trata-se do processo de usinagem eletroquímica de forma abrangente. Inicialmente, é feita uma abordagem das generalidades e dos princípios e a seguir, considerações gerais sobre o processo de dissolução anódica, reações catódicas e principais elementos do processo, com ênfase no ferramental e elementos de controle na usinagem.

### 2.1- Generalidades

Entende-se que para a compreensão do tratamento específico a ser feito neste trabalho, faz-se necessário um bom entendimento do processo ECM, assim como do mecanismo de remoção de material, uma vez que a acuracidade de forma da peça de que trata este trabalho, decorre da maneira com que a remoção de material é realizada.

Conforme **Benedict [1987]**, para a obtenção da alta acuracidade de forma com altas taxas de remoção de material, o processo requer altas densidades de corrente de dezenas ou mesmo centenas de amperes por centímetro quadrado, mantendo entretanto uma distância entre os eletrodos ferramenta e peça, "gap", muito pequena da ordem de 0,1 mm.

A ferramenta avança em direção ao eletrodo peça promovendo a remoção de material enquanto o material dissociado e o calor gerado na área do "gap" são removidos por um fluxo de eletrólito bombeado na interface ferramenta-peça, a alta velocidade.

A ECM oferece várias vantagens sobre outros processos de usinagem. Entre elas, a de que suas a taxa de remoção do material da peça independe de suas características físicas, tais como dureza, fragilidade, temperabilidade, tenacidade, condutibilidade térmica, etc, fatores estes que tipicamente comprometem os processo convencionais de usinagem.

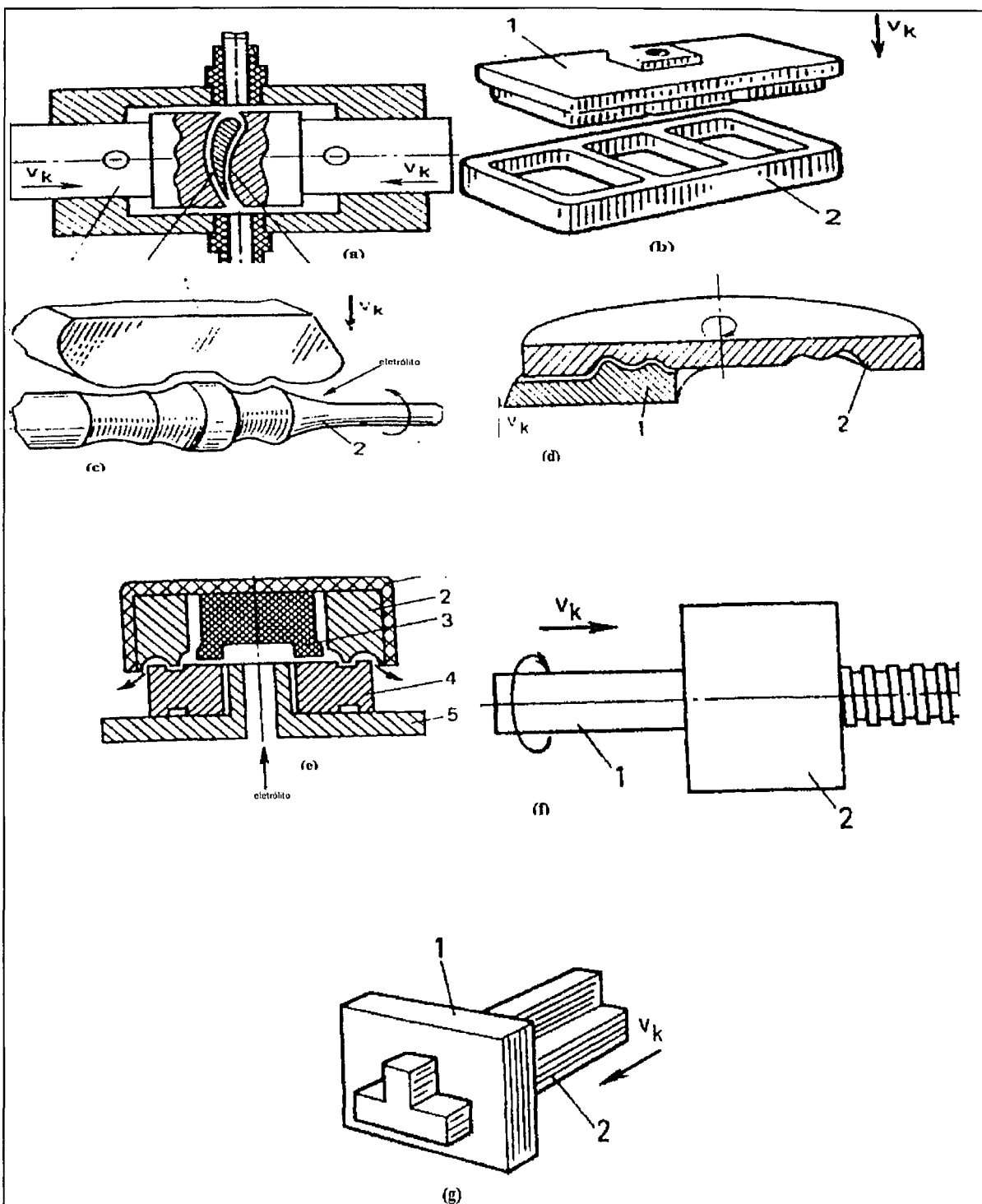
A ferramenta não necessita ser de materiais mais duros que o material da peça, uma vez que praticamente não sofre desgaste, pois não mantém contato físico com a peça

durante a usinagem, e por esta razão, a ECM é um processo adequado para se usinar paredes finas suscetíveis a deformações e materiais frágeis que desenvolvem trincas na camada superficial [Bhattacharyya,1971].

Na maioria dos casos, a ferramenta reproduz a sua superfície na superfície da peça, mas pode também gerar superfícies complexas simplesmente com a translação da ferramenta durante a usinagem, utilizando-se para tanto uma mesa CNC.

Rumyantsev & Davydov [1989], exemplifica várias aplicações da ECM que se apresentam na Figura 2.1. A figura 2.1(a) representa a usinagem de uma palheta de turbina, onde ambas faces são usinadas simultaneamente. O termo  $v_k$  representa a velocidade de avanço do catodo. Na figura (b) tem-se um torneamento eletroquímico, e em (f) tem-se a usinagem de uma rosca de fuso de esfera recirculantes. Nos exemplos (d) e (e) tem-se arredondamento de quinas e cantos.





**Figura 2.1** - Usinagens típicas obtidas em ECM: (a) Usinagem de palheta de turbina; (b) Usinagem de uma cavidade; (c) Torneamento eletroquímico; (d) e (e) Arredondamento de raios; (f) Brochamento eletroquímico de um fuso de esferas; (g) Brochamento de uma seção. [Rumyantsev & Davydov,1989]

A ECM não produz rebarbas e, pelas características mencionadas anteriormente, substitui várias operações de usinagem mecânica eliminando camadas com defeitos de superfície produzidas por processos anteriores. Em resumo, pode se dizer que as peças produzidas pela ECM são de alta qualidade, sob o ponto de vista da integridade superficial obtida [Cruz, 1995].

A ECM sofre restrições quanto a reprodução de forma, sendo este seu maior desafio. A geração de geometrias precisas é, às vezes, difícil, uma vez que requer o confinamento do processo de remoção de material somente dentro da área de interesse, devendo-se evitar, a todo custo, a remoção em áreas adjacentes.

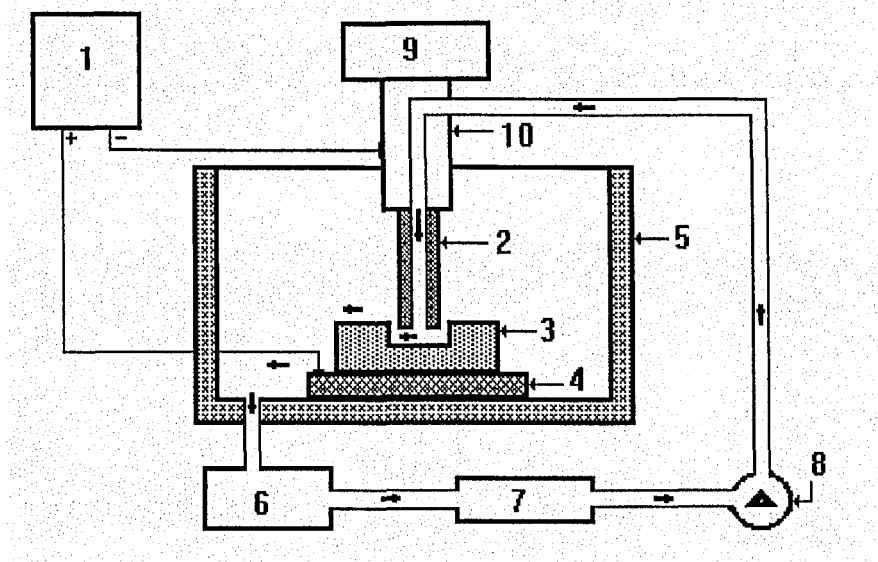


Figura 2.2 - Esquema Básico de um equipamento ECM [McGeough, 1988]

- |                         |                                    |
|-------------------------|------------------------------------|
| 1 - Fonte Corrente;     | 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.    |

A Figura 2.2 apresenta um esquema simplificado de um equipamento ECM extraído de **McGeough [1988]**. No processo ECM ideal, descrito também em **Malaquias [1996]**, tem-se uma fonte de corrente (1) conectada á peça anódica (3), cuja corrente gerada na interface ferramenta-peça provoca reações de dissociação anódica da peça e as reações catódicas na região da ferramenta. O esquema ainda apresenta em (4) a base da mesa, que comumente é comandada por um sistema CNC, a cuba eletrolítica em (5) responsável pelo retorno do eletrólito ao reservatório (6). O circuito conta ainda com um sistema de filtragem (7), uma bomba (8). Em (9) tem-se esquematizado o sistema de avanço do cabeçote porta-ferramenta (10), que como será abordado oportunamente neste trabalho, deve ser dotado de um servo mecanismo capaz de manter o “gap” constante. A usinagem eletroquímica é consequência da dissociação anódica, de modo que a forma com a qual a dissolução anódica ocorre determinará os resultados da usinagem. Esta dissolução anódica requer condições específicas, que são:

- uma distância entre anodo e catodo ( “gap”), muito pequena;
- altas densidades de corrente;
- alto fluxo de eletrólito na interface dos eletrodos.

Estas condições resultarão em uma alta taxa de remoção de material (que doravante será denominada simplesmente por TRM), boa acuracidade e fino acabamento superficial, este último associado às vantagens metalúrgicas que caracterizam a ECM [**Dabrowski, 1996**].

A fonte que compõe um equipamento de usinagem eletroquímica é do tipo retificadora de corrente, tendo como característica a tensão constante. Desta forma a corrente aplicada durante o processo passa a ser função da tensão ajustada na fonte e da resistência elétrica desenvolvida no sistema, conforme **Malaquias [1996]**. A capacidade

máxima de corrente da fonte é variável de equipamento para equipamento (500A a 10.000A), e torna-se fator de limitação do processo, para parâmetros tais como **Densidade de Corrente**, **Velocidade de Avanço**, conforme será abordado adiante.

O eletrólito mais usado é a salmora de NaCl (em concentrações de 10% a 50% em massa). Entretanto, outro sal bastante usado tem sido o NaNO<sub>3</sub> em concentrações que também podem variar de 10% a 40% em massa, conforme a aplicação [Pandey, 1985]. Outros eletrólitos também usados, porém com menor frequência, podem ser as soluções de NaClO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, etc.

Outro aspecto característico da ECM é a formação de gás H<sub>2</sub> junto ao cátodo (ferramenta), e por ser de fácil combustão, torna-se imprescindível o uso de uma redoma de captação e um sistema de exaustão, principalmente se o eletrólito utilizado for o clorato de sódio [Rumyantsev & Davydov, 1989]. Entretanto, sabe-se que o maior cuidado requerido com o clorato de sódio está no fato de se formar compostos explosivos. Assim em ambientes suficientemente ventilados, o hidrogênio formado não é o fator que exige os maiores cuidados.

Nos equipamentos mais completos que utilizam uma mesa comandada por um sistema CNC, esta suporta a cuba eletrolítica, a qual tem no seu interior a base de fixação do eletrodo peça. A rigidez da mesa, assim como de todo o equipamento é muito importante para o bom desempenho e funcionalidade.

O mecanismo de avanço que movimenta o porta-ferramenta deve ser automático, mesmo para o caso em que o equipamento não seja dotado de CNC. Esta automação do avanço confere alto desempenho ao equipamento, assim como permite o controle do “gap”, como será abordado ainda neste capítulo.

Normalmente tem-se obtido tolerâncias da ordem de **120  $\mu\text{m}$**  em processos típicos. Consta que em condições especiais pode-se obter até **10  $\mu\text{m}$** . Quanto ao acabamento superficial, é possível a obtenção de rugosidades em torno de  **$R_a = 0,5 \mu\text{m}$** , para a maioria dos aços e ligas de níquel. Entretanto, tem sido relatado resultados obtidos com aços cromo-níquel na ordem de  **$R_a = 0,1 \mu\text{m}$**  [Kozak,1995].

## 2.2 - Principais Elementos do Processo

Conforme **Figura 2..2**, vários são os elementos que compõem o equipamento que viabiliza a usinagem eletroquímica, entre os quais os elementos do circuito eletrolítico (cita-se o próprio eletrólito, o sistema de limpeza do eletrólito, o controle de temperatura, a potência do sistema de bombeamento), a fonte de energia elétrica, o eletrodo ferramenta e a peça a ser usinada.

Com vistas a um estudo dirigido especificamente aos objetivos deste trabalho, nesta seção serão considerados alguns destes itens relativos ao eletrólito, à fonte de energia e a ferramenta, os quais tiveram maior importância no caso.

Na literatura pertinente é notável a carência de informações e pesquisas específicas sobre o desempenho dos eletrólitos nos diferentes materiais modernos, como em aços-ferramenta, aços de alto teor de carbono, aços de alta liga, em superligas, e em cerâmicas e compósitos condutores. Há muito pouca informação também de como suas concentrações afetam seus desempenhos no tocante à taxa de remoção, acabamento e acuracidade de forma de peças. O que há de mais consistente na literatura é o que se registra com base nos trabalhos de **Rumyantsev & Davydov [1989]**, **Benedict[1987]** e **McGeough[1988]**.

O eletrólito usado no processo ECM encarrega-se das seguintes funções:

- Fechar o circuito elétrico entre os eletrodos peça e ferramenta;
- Possibilitar que as reações químicas desejadas ocorram;
- Retirar o calor gerado durante as reações químicas;
- Retirar os produtos das reações para fora da zona de usinagem.

Algumas propriedades essenciais para a seleção do eletrólito, são:

- Alta condutividade elétrica, baixa viscosidade;
- Alto calor específico;
- Estabilidade química;
- Resistência a formação de filmes passivadores sobre a superfície de trabalho;
- Não ser corrosivo e tóxico;
- Disponível e de baixo custo.

Todos estes fatores devem ser considerados na escolha do melhor eletrólito para um caso específico, todavia uma razoável experiência prévia será determinante para se fazer a melhor escolha. Na maioria das aplicações, uma solução de cloreto de sódio em água mostra-se satisfatória, mas sua alta corrosividade torna-se um problema. O nitrato de sódio também é largamente utilizado por ser menos corrosivo que o cloreto de sódio. Entretanto, a facilidade que o nitrato de sódio tem em formar filmes de passivação, quando usado com alguns metais, acabam por restringir o seu uso.

Outros eletrólitos alcalinos empregados no processo ECM são as soluções aquosas de: nitrato de potássio, sulfato de sódio, clorato de sódio, hidróxido de sódio, fluoreto de sódio e cloreto de potássio. Algumas vezes também, o uso combinado de dois ou mais eletrólitos produz melhores resultados, sob o ponto de vista da acuracidade e a taxa de remoção [Pandey, 1987].

Também soluções fracamente ácidas (por exemplo,  $\text{pH} = 5$ ), tal como as de ácido sulfúrico, produzem bons resultados quanto ao acabamento superficial. A **Tabela 2.1**, relaciona os eletrólitos mais utilizados, como também tem-se uma indicação quanto a concentração, vantagens e desvantagens. Registra-se que na referida tabela a concentração é expressa pela relação do peso do sal pelo peso da água em que o mesmo é diluído.

**TABELA 2.1** - Propriedades dos eletrólitos  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaClO}_3$ . Adaptado de

**Pandey[ 1987]**

| <b>ELETRÓLITO</b>  | <b>MATERIAL</b>              | <b>VANTAGENS</b>   | <b>DESVANTAGENS</b>   |
|--|------------------------------|--|---|
| <b><math>\text{NaCl}</math> ou <math>\text{KCl}</math> - até 40% em peso</b> | Aços e ligas a base de ferro | Baixo custo. Não tóxico. Usina a maioria dos materiais. Produz razoável acabamento superficial. Alta eficiência de corrente.   | Produz irregularidades nas áreas adjacentes. Provoca corrosão intergranular, por usinagem seletiva, em aços inoxidáveis. Falta de acuracidade nas peças.  |
| <b><math>\text{NaNO}_3</math> - 10 a 50% em peso</b>                         | Aços e ligas a base de ferro | Produz melhor acabamento superficial. Permite maior controle da área usinada.  | Mais caro do que o $\text{NaCl}$ . Pode causar incêndio. Altas concentrações são necessárias para se obter uma boa condutividade. Resistividade elétrica pode variar com a velocidade de escoamento do eletrólito e produzir linhas de fluxo. Tensões mais altas são necessárias. Condutividade é afetada pela temperatura. |
| <b><math>\text{NaClO}_3</math> - 20 a 50% em peso</b>                        | Aços e ligas a base de ferro | Produz superfícies muito lisas, brilhantes e isentas de corrosão. Condutibilidade praticamente não é afetada pela temperatura. Sem formação de estrias ("pitting") nas regiões adjacentes. Adequado para usinagem de precisão. | Alto custo. Tóxico. Alto risco de incêndio. Requer condições especiais de manuseio e estocagem. Baixa eficiência de corrente em baixas concentrações. Requer altas voltagens (aprox. 20V). Não usina abaixo de 9 V. Muito caro para ser usado em peças não especiais. Eletrólito tem que ser trocado freqüentemente.        |

O processo ECM requer o uso de altas densidades de corrente que podem alcançar até  $800\text{A}/\text{cm}^2$  e tensões de até **30 V.C.C**, em alguns casos. Entretanto, raramente usina-se peças com tensões acima de **20 Volts**, o que é atribuído ao comportamento das reações [Pandey, 1987].

A fonte de energia usada no processo ECM geralmente utiliza-se de uma tensão de linha de **220 V.A.C.** trifásica para suprimento do primário, podendo em casos em que a potência exceda a **50 kWA**, utiliza-se tensões de **380 V** ou **440 V**. Assim, pode-se dizer que com bastante constância em processos de fabricação pode-se atingir correntes acima de **10 kA** no secundário da fonte. As fontes eletrônicas são preferidas principalmente por oferecer melhores possibilidades de pesquisa de parâmetros de processo, conforme abordado no item sobre **Parâmetros do Processo**. Da mesma forma, as fontes eletrônicas são preferidas por tornar as fontes mais compactas e leves, e as tyrestorizadas por possibilitar um controle mais acurado das características da corrente, permitindo o uso de dispositivos eletrônicos que controlam o tempo de duração de cada pulso [Kozak,1981].. Não se pode ignorar que todo o processo de desenvolvimento de usinagem eletroquímica, envolve alguma pesquisa de parâmetros [Pandey, 1985].

Como algumas descargas elétricas e curtos circuitos podem ocorrer durante a usinagem, os quais são atribuídos a uma falta de controle eficaz de alguns parâmetros (por exemplo, o “gap”), um sistema de proteção deve fazer parte do controle da fonte de maneira a detectar e minimizar os seus efeitos, uma vez que a sua ocorrência implica em danos tanto para a ferramenta quanto para a peça [Weller,1984].

A precisão na fabricação do eletrodo ferramenta afeta diretamente a acuracidade produzida pela ECM, uma vez que a qualidade final da superfície da peça não poderá ser melhor do que a da ferramenta. Assim, defeitos na superfície da ferramenta são



reproduzidos na superfície da peça. Entretanto as irregularidades produzidas na peça não são oriundas somente das imperfeições reproduzidas da ferramenta, mas podem ser sobrepujadas pelas produzidas pelo regime de escoamento do eletrólito e pela desigualdade de densidade de corrente na interface, conforme será visto no item sobre dissolução anódica.

Os equipamentos de ECM, tais como qualquer máquina ferramenta, devem ser rígidos, e ter movimentos acurados e alinhamento em partes móveis, haja visto que o não atendimento a tais requisitos comprometem diretamente a acuracidade e a qualidade da superfície usinada. Da mesma forma, seus componentes devem ser fabricados de materiais resistentes a corrosão, entre os quais se destacam os aços inox, ligas de cobre, e materiais não metálicos (p.ex.: poliamidas).

O equipamento de ECM opera sob substanciais pressões de eletrólito, comumente na ordem de 1,4 MPa [Weller, 1984], ou entre 0,1 a 2,7 MPa [Rumyantsev & Davidov, 1989].

É desejável, mas nem sempre possível, manter constante a concentração do eletrólito e a densidade de corrente, dificuldade que decorre das diferenças de condições entre a entrada e a saída do eletrólito. A influência destes aspectos serão abordadas no capítulo 3, “FATORES INTERVENIENTES NA TRM E ACURACIDADE”, onde estes fatores serão vistos juntamente com as concepções básicas para o desenvolvimento do ferramental de ECM.

Quanto ao material de fabricação do eletrodo ferramenta, podem ser normalmente usados quaisquer materiais condutores. Entretanto, se destacam o cobre, bronzes, latão e eventualmente, aço inox. Considerações, no entanto, devem ser feitas sobre o potencial do catodo, uma vez que adequações podem ser necessárias à tensão a ser utilizada no processo. Por outro lado, a usinabilidade do material por processos convencionais e a

resistividade elétrica tornam-se fatores importantes na escolha do material. Por isso o cobre eletrolítico tem sido o preferido na maioria das aplicações industriais.

Conforme citado por **Weller, E. [1984]**, os problemas causados pelo fluxo desigual do eletrólito e diferenças de densidade elétrica entre as regiões de usinagem tem sido resolvidos com a técnica da retro-usinagem na fabricação da ferramenta. Como retro-usinagem entende-se a obtenção da geometria final da ferramenta pelo próprio processo ECM, a partir de uma peça usinada por processos convencionais de usinagem. Obviamente o material desta peça a ser usado como “ferramenta” para se produzir a ferramenta objeto do desenvolvimento, deverá ser adequado ao processo convencional a ser utilizado, com vista ao objetivo final.

A retro-usinagem é realizada com a simples inversão de polaridade da fonte de potência, passando a peça usinada convencionalmente a ser o catodo, enquanto a ferramenta objeto do desenvolvimento assume a posição de anodo.

Após isto, a simples inversão da chave comutadora, reverte às condições originais de usinagem. Este método é de grande valia, principalmente no desenvolvimento de ferramenta de geometria complexa, onde os modelos matemáticos não conseguem representar com fidelidade toda a dinâmica da usinagem.

### **2.3 - Dissolução Anódica**

A característica básica do processo ECM é a curva de polarização, que relaciona a densidade de corrente ( $J$ ) em função do potencial anódico ( $E_a$ ).

A **Figura 2.3** apresenta as curvas de comportamento típico da ECM para o Ferro, Níquel e suas ligas, quando usinados utilizando-se como eletrólitos os sais NaCl e NaNO<sub>3</sub>.

Segundo Rummyantsev & Davydov, [1989], são as seguintes as considerações que podem ser feitas sobre as curvas de polarização.

Antes da aplicação de uma tensão externa através de uma fonte transformadora e retificadora de corrente, o metal imerso no eletrólito apresenta um potencial eletrolítico  $E_{ss}$ , atribuído a diferença de eletronegatividade entre os eletrodos. Quando uma tensão é então aplicada, o potencial do eletrodo sobe para um valor  $E_1$ , porém não suficiente para iniciar uma dissolução anódica. Para isto ocorrer há a necessidade de se romper a passividade do metal. Com a manutenção desta diferença de potencial, a densidade de corrente sobe abruptamente atingindo a região de ativação anódica  $AB$ , a qual se atribui a “quebra” da camada adsorvida na superfície anódica de ions  $OH^-$ , pela ativação dos ions  $Cl^-$  do eletrólito.

Imediatamente, átomos metálicos da superfície da peça caem em solução formando compostos. Porém esta passivação não decorre somente pela camada de ions  $OH^-$ , mas também pela presença de impurezas, que a literatura consultada diz tratar-se de ions ou moléculas de subprodutos das reações secundárias.

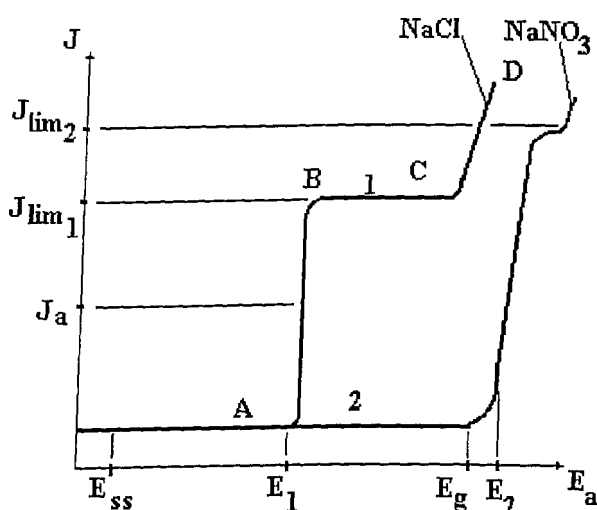


Figura 2.3- Curvas de polarização anódica representando duas formas de comportamento do processo ECM [Rummyantsev & Davydov,1989]

A ativação da reação pode ser facilitada pela ruptura da camada de filme dos óxidos anteriormente citados, o que pode decorrer pela presença de microtrincas na camada, outros defeitos superficiais, ou inclusão de outros óxidos que tenham como característica melhor condutibilidade elétrica, pelos quais se iniciaria a dissolução. A remoção do oxigênio das moléculas de óxido desestabiliza as ligações impedindo o aumento da camada de óxido, ou mesmo sua recomposição, isto pela manutenção da diferença de potencial  $E_a$ . Este é o ponto central para a ativação anódica. Com o decorrer do tempo, a superfície ativada do metal, sujeita portanto ao processo de dissociação, aumenta até alcançar uma situação de regime.

Neste ponto a taxa de dissolução do metal cessa de crescer, assim que um valor limite de densidade de corrente  $J_{lim}$  é alcançado, dentro da região **BC** da **Figura 2.3**. A densidade de corrente é contida pela imposição que a própria dissolução anódica estabelece dentro do volume de controle na região de dissociação. Assim, os produtos da dissociação, que no caso mais comum é o  $FeCl_2$ , forma um depósito de cor escura na superfície do eletrodo. Os cristais deste sal precipitam pela ação de supersaturação que ocorre na solução. Esta “passivação induzida pelo sal”, difere em termos do mecanismo de passivação inicial do metal, o qual caracteriza o ponto **A** da curva, uma vez que apresenta um potencial menor.

Por outro lado, a densidade de corrente não decresce na região **BC**, pois torna-se necessária para a manutenção de uma concentração da solução salina na superfície do eletrodo, quando se utiliza sais de alta solubilidade. Assim, obtêm-se valores menores para  $J_{lim}$  em concentrações maiores de eletrólito.

Na ECM o valor de  $J_{lim}$  pode ser aumentado várias vezes empregando-se mecanismo de agitação ao eletrólito, uma vez que seu valor está muito relacionado com a difusão do eletrólito.

O aumento da corrente decorre da evolução do oxigênio, mas principalmente pelo aumento da dissolução anódica do metal. Dentro desta região, onde a densidade de corrente é maior, não ocorre depósito de sal na superfície do eletrodo, o que pode ser observado via microscopia ótica.

Valores altos de corrente associados ao aumento da taxa de remoção de material, dentro da região **CD**, são atribuídos tanto pela agitação vigorosa do eletrólito provocada pela dissolução gasosa, como também pelo aumento de temperatura na superfície do eletrodo, que atingindo um valor crítico induz uma ativação térmica anódica.

Dentro da região **AB** o metal também é erodido, porém, pela maneira com a qual a dissolução anódica ocorre, implica em diferenças no acabamento superficial obtido. As várias áreas microscópicas dissolvem sob diferentes taxas de dissociação, o que produz uma superfície com rugosidade elevada. Já na região anódica **BC**, a superfície produzida é lisa ou mesmo polida.

A dissolução anódica dentro da região **CD** produz superfícies quase polidas para muitos metais, porém com macro defeitos em forma de linhas finas, ou estrias, que tem a orientação do fluxo do eletrólito. Estas estrias são atribuídas ao fato de a dissolução anódica ocorrer preferencialmente na porção de massa da camada mais próxima do eletrodo. E assim, qualquer distúrbio na região de dissociação, quer seja pela turbulência do eletrólito, alteração na lâmina de fluido, ou quer por movimentações do eletrodo ferramenta (causadas pelas vibrações devido ao regime hidrodinâmico do eletrólito), provocaram

alterações locais na espessura da camada de ligação, e conseqüentemente alterações na dinâmica do mecanismo de remoção.

O valor de  $J_{lim}$  é determinado pela velocidade de remoção dos produtos de dissolução anódica dentro da camada de ligação, e assim, depende da espessura desta camada. Uma vez que a espessura aumenta ao longo da superfície em direção ao fluxo do eletrólito devido ao aumento da concentração dos produtos dissociados,  $J_{lim}$  decresce na mesma direção.

Pode ocorrer uma situação em que, dependendo do valor de densidade de corrente prevista para trabalho, vazão de eletrólito dimensões da peça, a densidade de corrente efetiva poderá ser localmente menor do que  $J_{lim}$  estabelecido dentro da área **AB**, e em uma região adjacente a esta primeira, um valor de densidade de corrente maior que  $J_{lim}$ , dentro do regime de usinagem do trecho **CD** da curva do NaCl. Esta diferença entre regimes poderá trazer várias conseqüências para com a dissolução. Em primeiro lugar, não se tem uma superfície anódica equipotencial, e assim pontos diferentes da curva de polarização em regiões distintas. Segundo, a dissolução anódica terá taxas diferentes considerando as áreas **AB** e **CD** da curva, em terceiro lugar, haverá uma diferença na rugosidade média entre estas regiões. Este fato é tipicamente constatado na dissolução do níquel em solução de NaCl.

A curva de polarização 2 da **Figura 2.3** representa o comportamento da dissolução anódica do ferro, níquel e suas ligas em solução de  $\text{NaNO}_3$ , a qual também é característica para o  $\text{NaClO}_3$ . A principal diferença com relação aos comentários anteriores feitos para a dissolução em solução de NaCl está no fato de que não ocorre praticamente nenhuma dissolução anódica dentro da larga faixa de diferença de potencial, que se estende do valor de  $E_{ss}$  ao valor  $E_2$ , transpondo mesmo os valores intermediários da faixa  $E_g-E_2$ , região esta

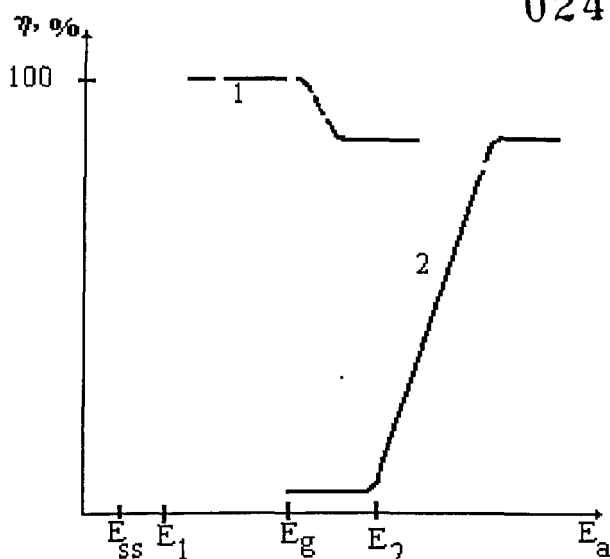
da evolução da passivação anódica do metal pelo oxigênio. Dentro desta faixa de potencial, a densidade de corrente necessária para ocorrer a evolução do oxigênio é consideravelmente alta.

A ativação aniônica destes eletrólitos ( $\text{NaNO}_3$  e  $\text{NaClO}_3$ ) é relativamente impedida, quando comparadas ao eletrólito  $\text{NaCl}$ , por necessitar de um notável potencial anódico substancialmente maior  $E_2$ ; maior mesmo que o potencial  $E_g$ , requerido para a água iniciar a sua decomposição com a evolução do oxigênio. Uma vez que o potencial  $E_2$  foi atingido, a evolução do oxigênio decresce consideravelmente com que tem início uma alta taxa de dissolução do metal. O ferro, por exemplo, é dissolvido formando compostos de  $\text{Fe (II)}$ , o que também o faz com o eletrólito  $\text{NaCl}$ .

A **Figura 2.4**, mostra a eficiência da corrente ( $\eta$ ) como função do potencial anódico, para os eletrólitos  $\text{NaCl}$  (curva 1) e  $\text{NaNO}_3$  (curva 2), para todas as faixas de polarização.

A dissolução anódica do níquel ativada a alta densidade de corrente em solução eletrolítica de  $\text{NaNO}_3$  pode produzir uma alta taxa de concentração de produtos dissociados e um depósito de sal na superfície anódica da mesma forma que ocorre com o eletrólito  $\text{NaCl}$ . Entretanto, o valor limite de corrente  $J_{lim}$  na curva 2 da **Figura 2.3** define uma faixa estreita de potencial, onde de fato ocorre remoção. Conclui-se que pequenas variações no “gap”, quando se trata do uso do  $\text{NaNO}_3$  como eletrólito, provoca razoáveis quedas de potencial. Assim, com a escolha de uma tensão apropriada de trabalho, pode-se obter resultados diferentes em regiões adjacentes, taxas acentuadas de dissolução onde o “gap” é pequeno mas suficiente para estabelecer uma tensão acima de  $E_2$ , e conseqüentemente uma densidade de corrente acima de  $J_{lim}$ .

02473/97



**Figura 2.4** - Curvas de Eficiência de corrente  $\eta$  em função do potencial do anodo  $E_a$  - (1) solução de NaCl ; (2) solução de NaNO<sub>3</sub> [Rumyantsev & Davydov,1989]

Por outro lado, tem-se uma queda acentuada de potencial devido ao desenvolvimento da resistência ôhmica decorrente do aumento do “gap”. Esta característica confere ao NaNO<sub>3</sub>, uma capacidade maior na obtenção de uma melhor acuracidade, quando comparado com o NaCl. Pode-se assim se sumarizar as propriedades contrastantes do NaCl com os eletrólitos NaNO<sub>3</sub> e NaClO<sub>3</sub>:

- 1) O potencial de ativação do NaCl ( $E_1$ ) é ligeiramente maior do que o  $E_{ss}$ , e a passividade do metal (que está entre  $E_{ss}$  e  $E_1$ ); é menor no caso do NaCl;
- 2) A passivação devido o sal formado não prejudica a dissolução do metal ( $J_{lim}$  tem um valor elevado);
- 3) O potencial de ativação do NaCl ( $E_1$ ) está abaixo do potencial de início da evolução do oxigênio ( $E_g$ ), logo há dissolução praticamente em toda a área exposta;
- 4) A eficiência da corrente para a dissolução metálica é bem mais alta para o NaCl, em toda a faixa de potencial de interesse para a usinagem eletroquímica.



Desta forma, este eletrólito causa dissolução em todas as áreas, e em diferentes potenciais, os quais se desenvolvem a despeito do “gap”. Este fato justifica a perda acentuada de acuracidade que se obtém com o uso deste eletrólito, quando comparado com os outros, como é o caso do  $\text{NaNO}_3$ . Em contra partida, o  $\text{NaCl}$  propicia uma alta taxa de remoção de material.

Com vista à acuracidade e à taxa de remoção de material,, pode-se enumerar três pontos de vital importância para o processo ECM.

- A ativação anódica da superfície, quando se obtém uma alta taxa de dissolução do metal, deve ocorrer em um potencial acima do necessário para romper a passivação devido a evolução do oxigênio.
- Sob o ponto de vista da ativação anódica do metal, a sobretensão de ativação da superfície para se manter a ionização do metal , deve ser baixa. E a sobretensão da evolução do oxigênio deve ser bem mais alta, quando comparada com a tensão de passivação da superfície; isto implicará em um aumento considerável da eficiência no que se refere ao potencial de ativação.
- *As considerações acima conduzem à seleção do eletrólito adequado. O  $\text{NaNO}_3$  e o  $\text{NaClO}_3$  satisfazem ambas as condições acima, enquanto que o quesito (1), não é satisfeito pelo  $\text{NaCl}$ .*
- As variáveis de processo ECM devem ser escolhidas de forma a estabelecer diferentes potenciais entre os limites das áreas a serem ou não usinadas, e devem ser baseadas no potencial de ativação anódica para o caso considerado.

Baseado neste último ponto, pode-se concluir que este é um método de confinar a dissolução anódica dentro da área de usinagem e manter elevadas densidades de corrente. Associando-se a escolha do eletrólito ao uso de uma corrente contínua pulsada, que traz

resultados melhores que uma corrente contínua e constante, pode se obter bons resultados para com a acuracidade de forma. As fontes de corrente pulsada tem mostrado bons resultados na usinagem da maioria dos metais, haja visto que reduz a passivação na interface, e diminui o gradiente de temperatura que se estabelece entre a entrada e saída do eletrólito, reduzindo a formação de bolhas [Kozak,1995].

A usinagem inicia-se após algum tempo depois da aplicação da tensão aos eletrodos. Mesmo que se a amplitude da corrente pulsada proporcionou uma densidade de corrente igual ou maior que  $J_a$ , a dissolução anódica não se iniciará enquanto não tiverem ocorrido: polarização dos eletrodos; passivação do metal (enquanto o potencial do anodo sobe de  $E_{ss}$  para  $E_g$ ) e evolução do oxigênio dentro da faixa de potencial  $E_g - E_2$ . Após  $E_2$  ter sido alcançada, algum tempo adicional ainda é necessário para a ativação do processo, a partir das remoções pontuais denominadas “pitting”, até a usinagem total da superfície. Para que a usinagem prossiga, é necessário que se tenha uma quantidade de eletricidade por pulso ( $Q_p$ ) maior que a requerida para que ocorram estas fases preliminares.

Tomando-se como base este ponto, é possível escolher variáveis de processo tal que o pulso da fonte de corrente excederão valor de ( $Q_p$ ) somente dentro de uma área frontal do “gap” onde o fluxo de corrente é máximo, ou seja onde o “gap” frontal é mínimo. A usinagem ficará assim restrita à área de interesse, desde que o “gap” seja mantido.

## 2.4 - Reações Catódicas

Segundo ainda Rummyantsev & Davidov [1989], normalmente, o processo catódico consiste na formação de hidrogênio representado pela equação abaixo:



ou a redução de ions do eletrólito, ou ambos. Assim o hidrogênio molecular formado no decurso da ECM, formará bolhas sobre a superfície do catodo. O fluxo do eletrólito tende a

manter estas bolhas aderidas à superfície, formando uma emulsão gás-líquido em forma de camada sobre a superfície. Se o eletrólito tem que percorrer uma grande distância dentro do “gap”, no caso de usinagem de peças grandes, estas bolhas irão preencher o “gap” pouco além da entrada do eletrólito. A camada gás-líquido produzida na superfície catódica causará um aumento da resistência elétrica, e em certas condições provocará uma sensível queda de tensão através da seção [Chuchro,1995].

A remoção do gás é facilitada pela alta velocidade de escoamento do eletrólito. A camada gas-líquido sobre o catodo decresce e a queda de tensão experimentada também decresce. Se entretanto, a densidade de corrente for alta e a vazão do eletrólito baixa, um grande número de bolhas se formará junto ao catodo, provocando um acréscimo da densidade de corrente na camada que separa as bolhas, o que causará um acréscimo de corrente na superfície do catodo. O eletrólito da camada que separa as bolhas irá vaporizar, formando uma camada gás-vapor isolante. A alta corrente romperá esta camada, o que acarretará descargas elétricas. Constatou-se que o diâmetro das bolhas aumenta diretamente com o aumento da densidade de corrente e é inversamente proporcional ao aumento da vazão no “gap”.

A temperatura medida na camada de gás-vapor com o uso de micro termopares apontou um gradiente entre  $15-20^{\circ}\text{C}$  maior que a temperatura de entrada, e o pH medido junto a superfície com uso de tubos capilares posicionados na faixa de  $40$  a  $50\ \mu\text{m}$  da superfície do catodo mostraram ser altamente alcalino. Isto praticamente delimita a condutividade elétricas às camadas limítrofes das bolhas.

O volume de gás presente no “gap” é responsável diretamente pelas variações na taxa de remoção de material ao longo do “gap” e na direção do fluxo do eletrólito, comprometendo sobremaneira a acuracidade do processo.

O uso de nitratos como eletrólitos, faz com que a formação de hidrogênio praticamente inexista ou pelo menos seja reduzida devido á redução que ocorre com o ânion  $NO_3^-$ .

A primeira fase desta reação, quando a solução for básica, pode ser representada pela equação:



Em condições favoráveis , esta reação pode continuar com a formação de produtos intermediários, até a formação de amônia.

Conclui-se que os nitratos geram menos gás  $H_2$  do que os cloretos. Consequentemente, haverá menos gases na interface ferramenta-peça. A adição de um pouco de cloreto de sódio em soluções concentradas de nitrato de sódio geralmente não provoca aumento na formação de gás.

## 2.5 - Parâmetros do Processo

Vários são os parâmetros que envolvem a ECM, Entretanto tem-se parâmetros passíveis de controle, de monitoração, e parâmetros controlados pela sinergia do processo. Entre os vários parâmetros controláveis, pode-se citar: **tensão da fonte/intensidade de corrente máxima, velocidade de avanço da ferramenta, pressão, vazão e concentração do eletrólito.**

Quanto ao sistema de avanço da ferramenta, pode-se ter três condições:

- usinagem com a ferramenta estacionária (estática);
- usinagem com avanço constante da ferramenta;
- usinagem com o “gap” constante (monitorado).

Na primeira condição, um valor inicial para o “gap” é prefixado. A usinagem é realizada até que a densidade de corrente aparente de trabalho, a qual pode ser obtida em função da corrente de trabalho e área de usinagem calculada, atinja um valor mínimo para o

qual praticamente não há dissolução de metais. Isto é característico na usinagem com o eletrólito é o  $\text{NaNO}_3$ . Na realidade, a queda na densidade de corrente se deve a evolução do tamanho do “gap” e conseqüente queda de potencial anódico, tornando-se inferior ao valor  $E_2$  da curva de dissolução característica [Figura 2.3].

A usinagem com avanço constante da ferramenta, requer condições adequadas para com a vazão e pressão de maneira a minimizar os efeitos decorrentes da evolução de gases e aumento da temperatura na interface ferramenta-peça, evitando curtos circuitos e descargas elétricas, conforme abordado anteriormente. Estabelecendo estas condições necessárias, um “gap” inicial é pré estabelecido, e iniciando-se a usinagem, o mecanismo de avanço constante da ferramenta é acionado. Geralmente a taxa de remoção de material inicialmente estabelecida, faz com que o tamanho do “gap” aumente até que a tensão anódica se ajuste em função da sinergia em que todos os fatores intervenientes na resistência do “gap, entram em equilíbrio.

O “gap”, entretanto, pode ser monitorado quando o avanço da ferramenta for assistido por um sistema apropriado. Conforme Rumyantsev [1989], os equipamentos assistidos por este sistema, alternam períodos de usinagem e de restabelecimento do “gap”. Na fase inativa da usinagem, portanto com a corrente interrompida, a ferramenta avança até tocar a peça e afasta de forma a restabelecer o “gap”.

Quando a fonte de potência utilizada é do tipo tyrestorizada de corrente pulsada e controlada eletronicamente (preferida nas pesquisa mais recentes), pode-se controlar além da tensão média, outros parâmetros característicos da onda, tais como: frequência, tensão de pico, tensão de base, tempo de pico e tempo de base.

Entre os parâmetros controlados pela sinergia do processo, podemos relacionar: “gap”, tensão no “gap”, intensidade de corrente (para fontes tipo tensão constante),

**temperatura na interface**, e mesmo a **densidade de corrente** uma vez que esta não é uniforme na face de usinagem.

### 3 - FATORES INTERVENIENTES NA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL (TRM) E ACURACIDADE DE FORMA (ACF)

Os dois principais parâmetros de avaliação do processo de usinagem eletroquímica são, como já mencionado, a taxa de remoção de material (TRM) e a acuracidade de forma (ACF) da geometria da peça que se deseja usinar.

Mais que em qualquer outro processo de usinagem, incluindo-se aqui não só os não tradicionais como também os tradicionais, este binômio TRM e ACF é altamente relevante não só porque o objetivo máximo de qualquer processo, é associar alta taxa de remoção com a máxima precisão possível, mas também porque, especificamente neste processo e contrariamente à grande maioria dos outros, quanto maior a TRM maior é a ACF [DeReget,1986].

O acabamento superficial, que normalmente é outro ponto de grande interesse para a maioria dos processos, não o é aqui visto que, via de regra, em todas as condições de corte o processo conduz a bons acabamentos. De forma também bastante diferente, quanto mais rápida a usinagem por ECM, maior o acabamento superficial, de acordo com [Benedict,1987]. O que causa preocupação neste processo, em se tratando de acabamento superficial, são as irregularidades macroscópicas como ondulações e estrias decorrentes de jatos eletrolíticos turbulentos e projetos de ferramental deficientes, conforme mencionado no item 2.3 sobre dissolução anódica.

Embora a taxa de remoção de material seja decorrente da dissociação anódica já estudada, neste capítulo procura-se quantificá-la através de expressões a partir das quais os fatores nelas presentes são realçados. Embora a acuracidade de forma, como dito depende

da TRM, outros fatores interferem no seu valor. A relação dos fatores mais importantes, bem como os comentários, são apresentados no final do capítulo.

### 3.1- A Taxa de Remoção de Material

Define-se a taxa de remoção de material (TRM) como sendo a quantidade volumétrica de metal dissociada em um intervalo de tempo ( $\Delta V/ \Delta t$ ).

Com base nas Leis de Faraday, a quantidade de massa de metal dissociado em um processo eletrolítico, é dada por:

$$\Delta m = \eta E I \Delta t \quad (3.1)$$

onde,

$\eta$  = eficiência de corrente;

$E$  = equivalente eletroquímico =  $A/z.F$

em que:

$A$  = Peso atômico do metal

$z$  = valência ou número de oxidação

$F$  = constante de Faraday = 96487 Coulomb

Da expressão acima deduz-se que, a quantidade de massa de metal dissociada depende diretamente da intensidade de corrente ( $I$ ) e do Equivalente eletroquímico ( $E$ ) do mesmo. Entretanto conforme abordado no início deste capítulo, nem toda corrente produz dissociação metálica. Daí, a expressão acima levou em conta a eficiência de corrente ( $\eta$ ).



Como,

$$TRM = \Delta V / \Delta t = \Delta m / d \cdot \Delta t \quad (3.2)$$

tem-se que,

$$TRM = \eta AI / dzF \quad (3.3)$$

onde,

$d$  = massa específica do metal ( $Kg/m^3$ ).

Tratando-se de ligas metálicas ter-se-á a dissolução de dois ou mais elementos químicos. Postula-se que a dissolução se dê independente e simultaneamente com os elementos que compõe a liga, e assim a TRM pode ser expressa pela seguinte equação:

$$TRM = I \cdot \eta / (F \sum n_i \cdot z_i / A_i) \quad (3.4)$$

onde ,

$n_i$  = é a fração do elemento dissociado . Logo a eficiência da corrente para a liga será a ponderação da eficiência de cada elemento componente da liga.

$$\eta = (\Delta m \cdot F/Q) (m_1 \cdot z_1 / A_1 + m_2 \cdot z_2 / A_2 + \dots + m_n \cdot z_n / A_n) \quad (3.5)$$

onde,

$A_i$  = massa atômica de elemento;

$m_i$  = massa dissociada do elemento; (\*)

$z_i$  = número de oxidação do elemento; (\*)

(\*) Ressalva deve ser feita quando um elemento químico da liga tem mais de um n<sup>o</sup> de oxidação (valência), como é o caso do Cr (VI) e Cr (III). Neste caso são considerados separadamente, onde o ensaio estequiométrico dos produtos da reação determinarão o percentual de cada composto.

A resistência elétrica no "gap" como visto, é variável, o que faz com que se tenha uma diferença na densidade de corrente, conforme abordado anteriormente. Outrossim, parâmetros como temperatura do eletrólito, pureza, concentração, afetam a resistência no "gap" e portanto influenciam drasticamente na eficiência do processo. Entretanto considerando uma resistência ohmica média, pode-se expressá-la como sendo:

$$R = a\rho/S$$

(3.6)

onde:

$a$  = distância ferramenta/peça - "gap";

$\rho$  = resistividade do eletrólito;

$S$  = área da projeção ortogonal da superfície usinada;

Pelas razões já abordadas, é difícil se determinar com exatidão qual é a corrente que realmente processa a dissociação anódica. Mas como vimos, a resistência no "gap" é algo finita, e, assim sendo, a corrente pode ser expressa pela expressão (3.7):

$$I = (V - E_a + E_k) \cdot S / \rho a$$

(3.7)

onde,

$V$  = tensão da fonte;

$E_a$  = potencial do anodo;

$E_k$  = potencial do catodo;

Das duas expressões (3.3) e (3.7) tem-se, finalmente, a expressão (3.8) que reúne os mais importantes parâmetros dos quais depende a TRM.

$$TRM = (\eta A / dzF) \cdot [ (V - E_a + E_k) \cdot S / \rho a ] \quad (3.8)$$

Conforme pode-se observar, a eficiência de corrente ( $\eta$ ) afeta diretamente a taxa de remoção de material. Mas vale lembrar que a eficiência depende da natureza do eletrólito, e tensão aplicada da fonte ( $V$ ), conforme visto no capítulo 2. Em complemento a esta consideração, pela expressão conclui-se que a tensão da fonte contribui diretamente com a TRM.

Metais de massa atômica elevada, por sua vez, proporcionam alta TRM, porém a densidade alta que normalmente é característica destes metais, afetam inversamente.

O potencial do catodo  $E_k$  depende muito pouco do material do catodo e da composição do eletrólito. Mas é sobremaneira dependente do pH do eletrólito, se ácido ou básico. Em alguns casos o potencial do anodo  $E_a$  é quase independente do material da peça, composição do eletrólito, e velocidade do eletrólito através do “gap”. Em outros casos, a dependência desses fatores é de fato representativa.

A resistividade elétrica do eletrólito ( $\rho$ ) apresenta uma larga faixa de variação, que no caso do cloreto de sódio se situa na faixa de **16,66 a 5  $\Omega \cdot \text{cm.}$** , para concentrações de **5% a 20%** em massa. Na ECM, como já visto, aproximadamente metade do “gap” é preenchido com gás, e com o aquecimento do eletrólito, a resistividade na saída do “gap” pode ser muito diferente de seu valor na entrada.

O metal em dissociação pode formar compostos com números de oxidação diferentes ( $z$ ). A formação de diferentes produtos que o metal pode formar, dependerá do potencial aplicado da fonte, do eletrólito utilizado e do sistema de lavagem na interface ferramenta-peça. Tanto produtos quimicamente estáveis com instáveis podem se formar na interface, em razão da diferença de potencial aplicado. O cromo, por exemplo, pode oxidar com valência VI e III. Assim, a expressão (3.8) pode levar em conta, as frações de cada subproduto da reação, fração esta que pode ser obtida pela análise química do eletrólito, conforme mostra a expressão 3.5.

E por último, porém não menos importante, está o “gap”, na expressão (3.8) representado pelo ( $a$ ). Na realidade este é um fator muito importante para com a TRM. Pela análise da expressão, conclui-se que este deve ser minimizado ao máximo, mantendo uma abertura suficiente para que o eletrólito cumpra o seu papel. A resistência desenvolvida no “gap” depende diretamente de seu tamanho, e assim também dependerá a intensidade de corrente, que é função desta. E, conforme citado pela literatura clássica [McGeough,1988], TRM depende sobremaneira da intensidade de corrente, lembrando porém, que há o fator eficiência de corrente ( $\eta$ ) a ser considerado.

### 3.2 - Acuracidade de Forma

A acuracidade do processo depende das características do equipamento tais como, sistema de filtragem do eletrólito, mecanismo de controle do “gap”, resposta dinâmica do sistema, etc. Como parte do processo, inclui-se o projeto da ferramenta (etapas previstas para usinagem, sistema de lavagem eletrolítica, trajetória do eletrólito, recobrimento das faces secundárias, etc). E ainda podemos citar a escolha do sal a compor o eletrólito (p.ex:  $\text{NaNO}_3$  produz melhores resultados para efeito da acuracidade na usinagem da maioria dos metais, como já mencionado), velocidade de avanço para desbaste e acabamento.

A acuracidade de forma pode ser entendida sob os seguintes aspectos:

- A transferência da forma da ferramenta para a peça;
- conformidade da peça acabada para com os requisitos do projeto, sob o ponto de vista dimensional e de forma;
- A repetitividade dimensional dentro de tamanho de lote, estatisticamente representativo.

Qualquer que seja o ponto de vista utilizado, no entanto, pode-se dizer que a acuracidade de uma peça usinada por ECM depende de muitos fatores. Os mais importantes acham-se indicados na **Figura 3.1**, cujo diagrama é uma síntese do trabalho de vários autores, entre os quais **Kozak et al [1996]**, **Jain & Rajurkar [1991]**, **Kozak et al [1981]**.

Conforme mostra o referido gráfico, há basicamente cinco fontes principais de fatores que interferem na acuracidade da peça, a seguir descritas sucintamente.

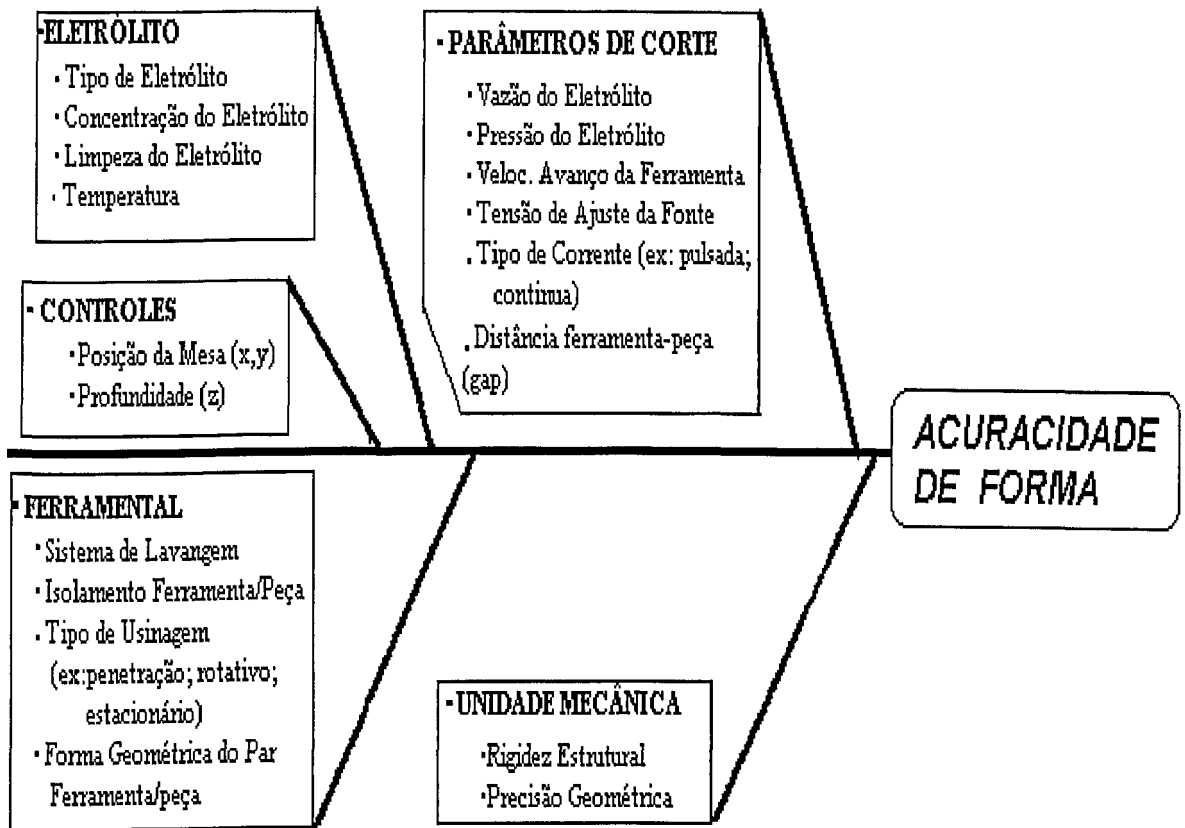


Figura 3.1 - Fatores Intervenientes na Acuracidade de Forma

**Eletrólito:** Dependendo do eletrólito escolhido, wazzu tem-se graus de confinamento das reações anódicas completamente diferentes. Como diz Rummyantsev & Davydov [1989], o  $\text{NaNO}_3$  confere maior grau de confinamento do que o  $\text{NaCl}$ , restringindo as reações anódicas às áreas mais próximas da ferramenta, e assim imprimindo de forma mais acurada sua forma à peça. Isto se deve à maior resistividade elétrica que a solução daquele eletrólito apresenta em relação ao  $\text{NaCl}$  para uma mesma concentração. A concentração do eletrólito e limpeza também influem na acuracidade.

**Controles:** Os controles a que se refere a Figura 3.1 são os controles de posição do par ferramenta-peça, onde são normalmente usadas as coordenadas (x,y) para o movimento da

peça através de uma mesa de coordenadas CNC, e movimento de penetração ( $z$ ) da ferramenta em relação à peça. Como na maioria dos casos utiliza-se a usinagem por penetração, com a ferramenta avançando no eixo ( $z$ ) de encontro à peça, é requerido um sistema que controle este movimento e interrompa a usinagem a uma profundidade predeterminada. Quanto maior a precisão com que o sistema obedece a esta profundidade, maior a acuracidade da peça.

**Parâmetros de Corte:** Dentro deste contexto agrupam-se os parâmetros elétricos (tensão da fonte e tipo de corrente), hidráulicos (vazão e pressão do eletrólito) e mecânicos (velocidade de avanço da ferramenta, distância ferramenta-peça ou “gap”). O “gap” pode ser monitorado quando o avanço da ferramenta for assistido por um controle eletrônico específico [Rajurkar *et al.*1985]. Quando não, procura-se experimentalmente uma velocidade de avanço constante de tal forma que a taxa de remoção do material seja compatível com tal avanço. Nos ensaios apresentados neste trabalho, optou-se por esta alternativa, como também a de se usinar com a ferramenta estática, com o reposicionamento da ferramenta periódico para se restabelecer o “gap” inicial. Muitos trabalhos tem sido publicados mostrando as influências de tais parâmetros para diferentes materiais e geometrias da peça, indicando os valores ideais para cada caso específico. Entre estes trabalhos citam-se: **Rumyantsev & Dovydov [1989], Malaquias [1996], Benedict [1987], Kozak [1981], Weller [1984] e McGeough [1989].**

**Unidade Mecânica:** A unidade mecânica de um equipamento ECM, composta basicamente de uma base, de uma coluna, um cabeçote porta-ferramenta e uma mesa de coordenadas onde se apoia uma cuba eletrolítica, deve ser suficientemente rígida para suportar as elevadas pressões dinâmicas do eletrólito durante a usinagem. Dependendo

desta rigidez tem-se melhor estabilidade dos parâmetros que afetam a acuracidade, tais como o “gap”, conforme abordado no capítulo 2.

**Ferramental:** Por último, alguns comentários um pouco mais detalhados deste quesito por se relacionar mais de perto com este trabalho. Entende-se por ferramental não só o eletrodo ferramenta propriamente dito, como também o sistema de fixação da peça e o sistema de injeção e lavagem do eletrólito. Em relação à ferramenta, de acordo com **Jain & Rajurkar [1991]**, considera-se que ainda não existe um modelo matemático para o projeto da ferramenta para uma dada geometria requerida da peça. Assim sendo, de acordo com **Rumyantsev & Davydov [1989]**, inicia-se pelo projeto da ferramenta com base em modelo ideal, e a partir deste ponto, e interativamente, faz-se refinamentos com soluções teóricas e práticas até a obtenção de um nível de acuracidade pretendido. Segundo este autor, o modelo ideal parte das seguintes simplificações:

- As Leis de Ohm aplicam-se em toda a superfície compreendida pelo “gap” entre os eletrodos;
- A condutividade elétrica do eletrólito no “gap” permanece constante, em função do tempo e deslocamento;
- Em cada eletrodo, o potencial permanece o mesmo em toda superfície a despeito do tempo e área da mesma;
- A eficiência da corrente para a dissolução anódica do metal é a mesma em toda a superfície da peça. Ainda considera-se que o campo elétrico se estabelece somente dentro do “gap”, e que obedece as Leis de Faraday e Ohm.

É desejável, mas nem sempre possível, que a densidade de corrente seja constante, porém geralmente diferenças de temperatura entre a entrada e a saída do eletrólito e a



presença de gases emulsionados e dissolvidos à solução dentro do “gap”, fazem com que a densidade de corrente varie tanto durante o processo, conforme abordado anteriormente.

Ainda considera os referidos autores, que o campo elétrico estabelece-se somente dentro do “gap”, e assumem que obedece às Leis de Faraday e Ohm.

Conforme citado por **Weller [1989]**, os problemas causados pelo fluxo desigual do eletrólito e diferenças de densidade elétrica entre as regiões de usinagem tem sido resolvidos com o emprego de uma retro-usinagem, ou seja, a obtenção da geometria final da ferramenta pelo próprio processo ECM, a partir de uma peça usinada, que possa mesmo ser produzida por processos convencionais de usinagem. A ferramenta objeto do desenvolvimento será um modelo invertido do processo, que utiliza os mesmos parâmetros escolhidos para o processo de fabricação.

Não basta, porém, o bom projeto da ferramenta. É preciso projetar adequadamente o sistema de lavagem e injeção do eletrólito tendo em vista que o fluido eletrolítico é a verdadeira ferramenta do processo.

A formulação teoria da reprodução da geometria da ferramenta na peça não esta sendo abordada neste capítulo, porém o será no capítulo 4, como parte do desenvolvimento da geometria da ferramenta usada nos ensaios experimentais.

Um sistema de filtragem do eletrólito deve ser usado, para remover as partículas maiores em suspensão. As impurezas que aparecem no eletrólito afetam não somente a eficiência do processo, mas também a acuracidade da forma. Estas quando assumem dimensões consideráveis podem causar curto circuito ou abertura de arco voltaico, uma vez que o "gap" geralmente é muito pequeno ( $0,1 \leq a \leq 0,5 \text{ mm}$ ). Isto provoca danos à ferramenta e à superfície da peça quanto ao acabamento e a integridade superficial [**McGeough,1988**].

Mesmo não provocando curtos circuitos, as partículas presentes no eletrólito podem provocar turbulências no jato eletrolítico e atacar de forma diferenciada posições diferentes da peça, com a consequente perda de acuracidade. Neste caso, podem aparecer ondulações, estrias e outras imperfeições macroscópicas, como já mencionado. Outro efeito, bastante observado (vide capítulos 4 e 5 ), são os possíveis empilhamentos de partículas nas regiões mais estreitas do ferramental impedindo a passagem do eletrólito com a consequente falta de remoção do material na região.

## 4- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Um dos objetivos deste trabalho, apresentados no Capítulo 1, é a exploração do processo de usinagem eletroquímica visando a comprovação dos dados da literatura, conhecimento de detalhes pertinentes ao processo e domínio na preparação de experimentos, especialmente na elaboração do projeto do ferramental, com vistas à obtenção de um entalhe circular em aço ABNT M2. Neste capítulo, descreve-se o procedimento experimental utilizado apresentando os equipamentos utilizados, o material e a geometria da peça a ser usinada, as alternativas de ferramentas projetadas e os parâmetros usados na usinagem.

A metodologia experimental utilizada está sintetizada no diagrama da **Figura 4.1**. Entretanto, nos testes preliminares, foram identificados vários pontos do equipamento de ECM os quais necessitaram melhorias com vista a viabilização dos ensaios experimentais.

Algumas concepções de ferramental preliminares foram logo abandonadas, pois geraram geometria bastante imprecisas e irregulares como será visto no Capítulo 5 - Resultados e Análise de Resultados.

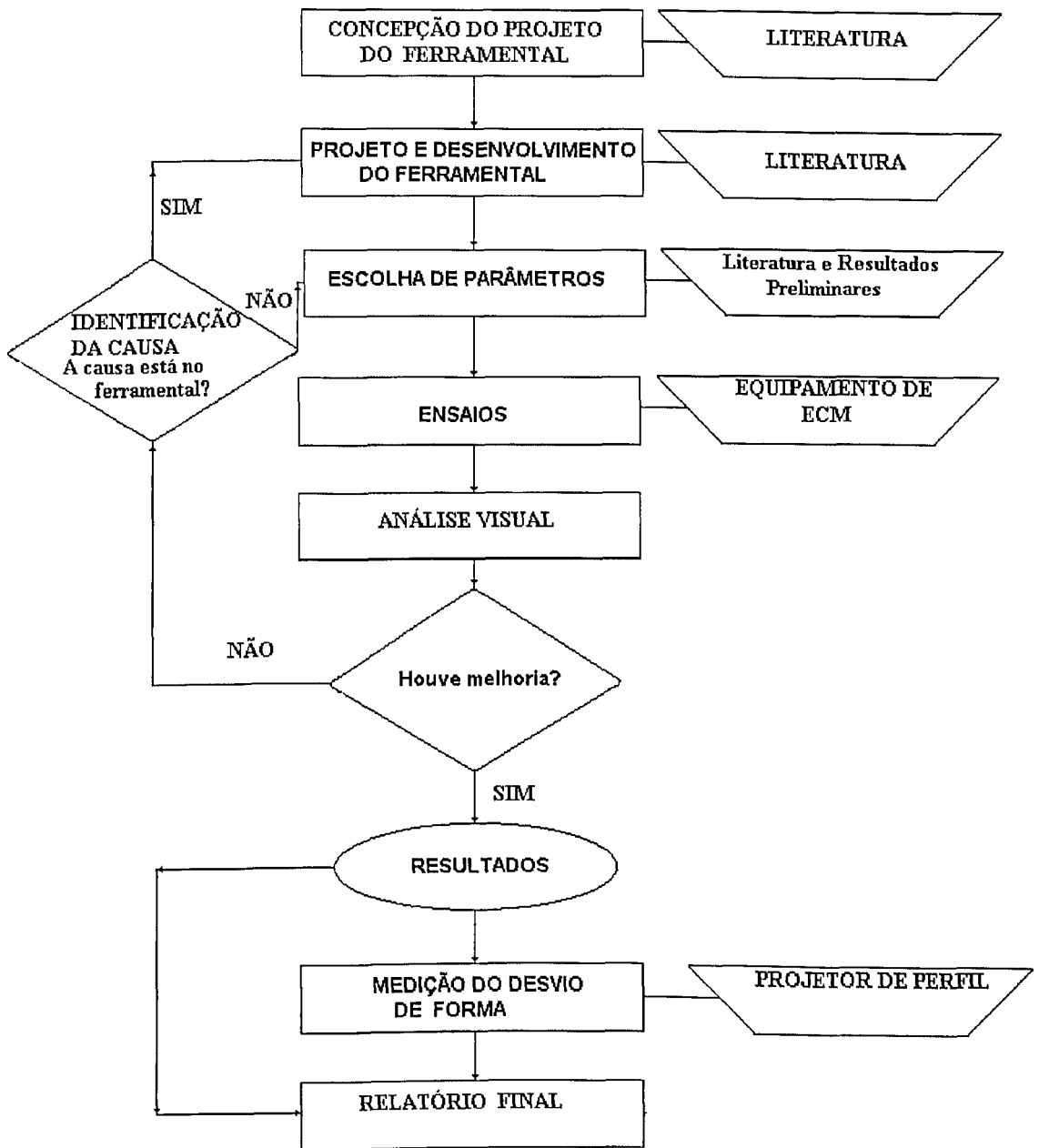
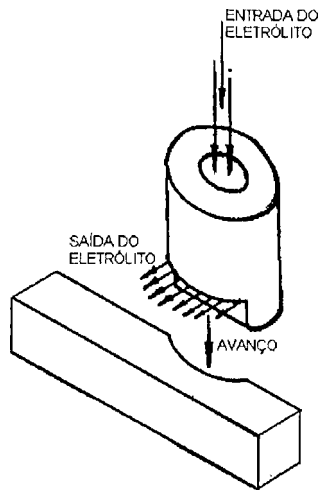
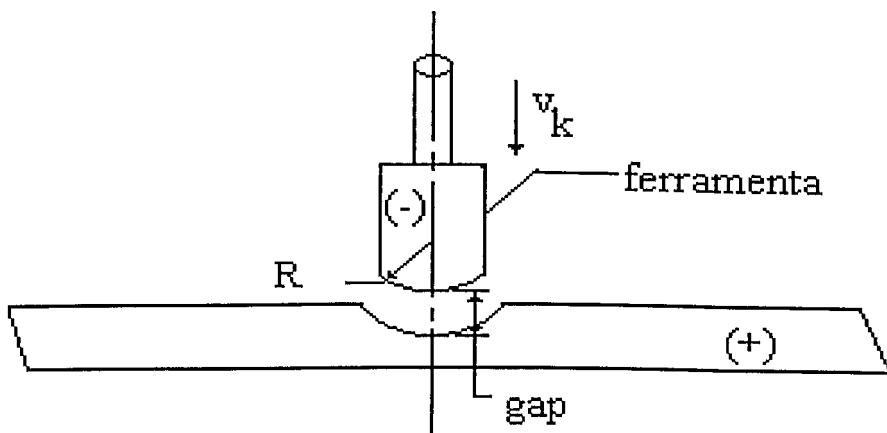


Figura 4.1 - Fluxograma Representativo da Metodologia Experimental Utilizada

A metodologia consistiu em se partir de duas concepções básicas de usinagem, as quais foram baseadas na literatura consultada. Estas duas concepções estão esquematizadas respectivamente nas **Figuras 4.2 e 4.3**. Na primeira, o movimento de avanço da ferramenta foi paralelo a geratriz da geometria do entalhe. Já na segunda, o avanço se deu perpendicularmente à geratriz.



**Figura 4.2** - Esquema de usinagem com avanço da ferramenta paralelo a geratriz do entalhe

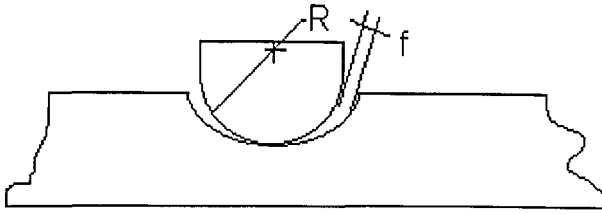


**Figura 4.3** - Esquema de usinagem com avanço da ferramenta perpendicular a geratriz do entalhe

As duas concepções foram testadas em câmara fechada e aberta. Entende-se como câmara aberta a condição que caracteriza a usinagem sem controle de pressão de saída do eletrólito, uma vez que esta se dá em ambiente aberto dentro da cuba.

Para usinagem em câmara fechada, foram desenvolvidos dois projetos de ferramentais, cujos desenhos estão no final deste trabalho nos Anexos I e II. Já para a usinagem em câmara aberta, foram utilizadas várias ferramentas para testar as duas concepções de corte acima descritas. Entretanto, o teste em câmara aberta, com a ferramenta avançando perpendicularmente à geratriz do entalhe, trouxe maus resultados para com a acuracidade de forma, e por esta razão foi descartada. Assim, apenas alguns resultados obtidos serão incorporados ao trabalho. Dito isto, este trabalho apresenta três projetos de ferramentais de usinagem. Os dois ferramentais empregados nos testes em câmara fechada, que passam a ser identificados como **Ferramental I e II** em deferência aos Anexos I e II, e o **Ferramental III** que assim designará a única opção de usinagem em câmara aberta que será apresentada.

Detalhes serão fornecidos ainda neste capítulo sobre estes ferramentais, assim como sobre as características do equipamento de usinagem, peça usinada, peça padrão, e outros referentes a metodologia experimental. Os ensaios experimentais foram feitos com base nos parâmetros apresentados adiante, e realizada uma análise visual comparativa com um padrão de entalhe adotado. Os melhores resultados obtidos foram selecionados e medidos em projetor de perfil, em termos de desvio de forma com base no padrão adotado. A **Figura 4.4** esquematiza a medida (**f**), tomada no ponto de maior desvio da acuracidade de forma.



**Figura 4.4** - Esquema da avaliação quantitativa da acuracidade de forma

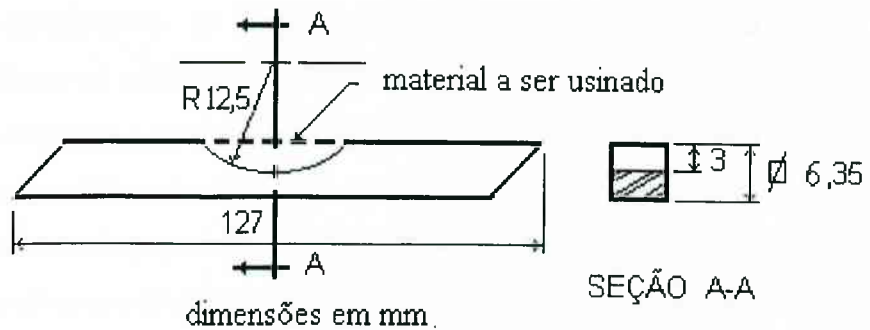
#### 4.1 - A Peça a Ser Usinada

Foi escolhido para material da amostra o aço rápido ABNT M2, cuja composição química segundo o fabricante, é a seguinte: C = 0,85%; Cr = 4%; V = 2%; W = 6%; Mo=5%. A escolha deste material se deve ao fato de ser o mesmo largamente utilizado na manufatura de ferramentas, e principalmente por ser considerado um material de difícil usinagem por processos convencionais de usinagem. Entretanto, é notório que os processos abrasivos ou térmicos, tais como a Usinagem por Descargas Elétricas e a Laser, produzem transformações metalúrgicas superficiais indesejáveis, que redundam em microtrincas e comprometem a integridade superficial da peça acabada. Outrossim, a Usinagem Eletroquímica como descrita no Capítulo 2 deste trabalho, é um processo que privilegia a integridade superficial.

O material utilizado foi adquirido na forma de barras de seção quadrada de 6,35 mm., no comprimento de 127 mm. Quanto a procedência, o material utilizado foi fabricado pelo fornecedor Avibas e beneficiado por Tool Master Ind. Metalúrgica Ltda. Segundo o fabricante, a sua dureza varia de 64 a 65 Rockwell C. Entretanto, teste realizados em 30 amostras, em um total de 50 medições, apresentaram uma dureza média de 60 HRc com um desvio padrão de 4 pontos.

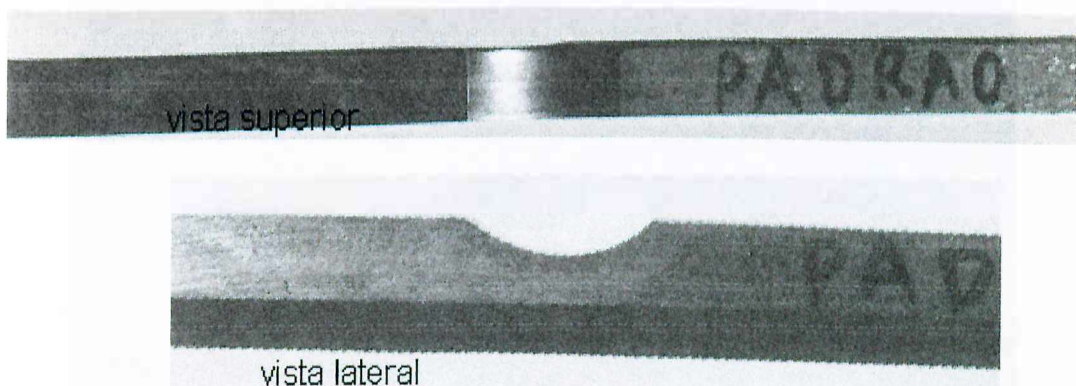
A usinagem planejada foi a geração do entalhe circular na barra, apresentado na **Figura 4.5**. Devido ao fato de ser uma geometria relativamente complexa (pela existência

de dois planos de simetria), o entalhe foi escolhido principalmente porque poderia apresentar uma certa dificuldade técnica na sua execução. E como foi mencionado, uma das maiores desvantagens do processo é a dificuldade de obtenção de formas geométricas acuradas.



**Figura 4.5** - Configuração da geometria da peça usinada

A **Figura 4.6** apresenta uma peça adotada como geometria padrão, a qual foi usinada pelo processo de eletroerosão com ferramenta especial em regime de superacabamento, cujos detalhes podem ser vistos em Lima [1997].



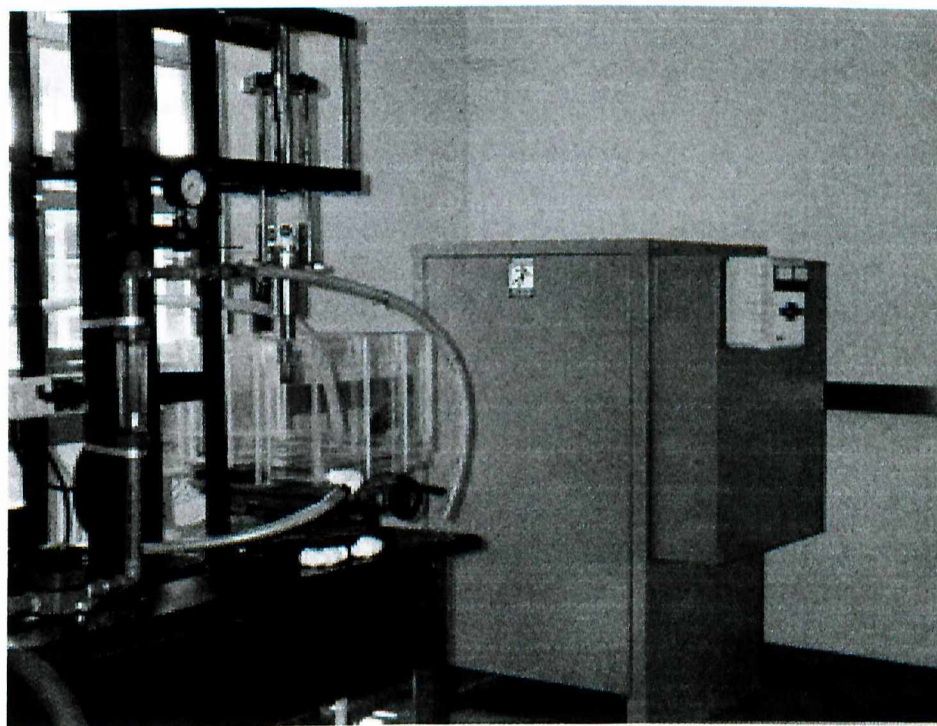
**Figura 4.6** - Padrão de geometria adotado - Fabricado em Aço ABNT M2 pelo processo de eletroerosão [Lima,1997]



## 4.2 - A Máquina Eletroquímica Utilizada

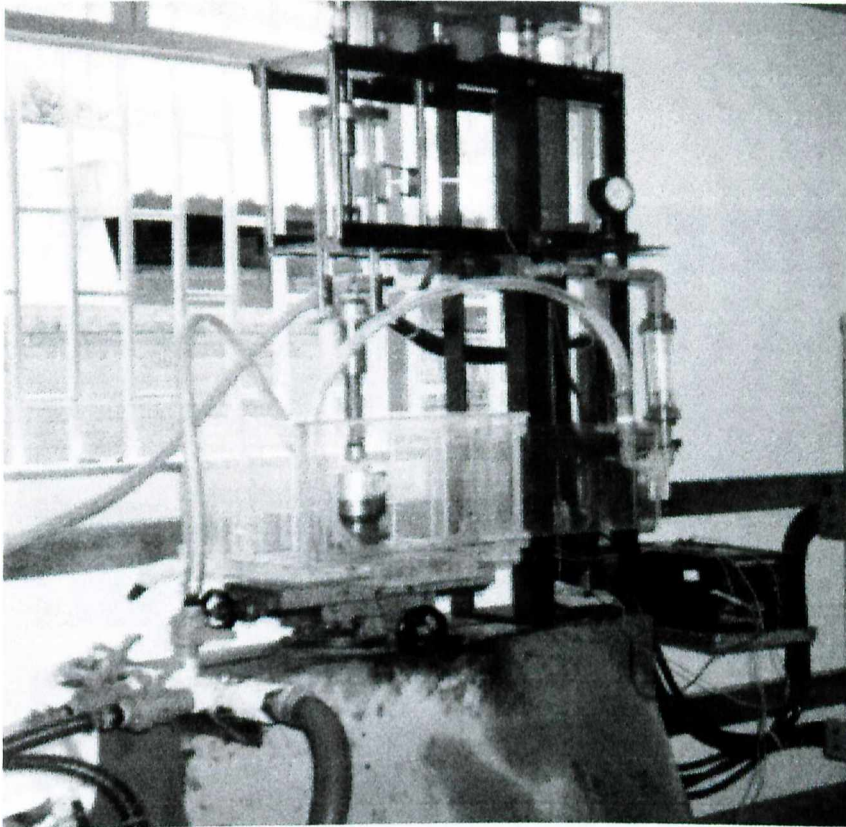
O equipamento utilizado neste trabalho foi o protótipo de usinagem desenvolvido dentro do Laboratório de Usinagem Não Tradicional do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, cujos detalhes mais aprofundados podem ser vistos em **Malaquias [1996]**.

Várias modificações, no entanto, foram feitas no protótipo para que o mesmo pudesse ser aplicado ao presente trabalho. Entre essas modificações estão: a utilização de nova fonte de potência (a ser descrita adiante), uma nova base de aço (no lugar da antiga de madeira) para conferir maior rigidez ao conjunto, e o enrigecimento geral da estrutura do conjunto da coluna, cabeçote e mesa. A **Figura 4.7** apresenta o equipamento no início do trabalho, porém já com a nova fonte de potência incorporada. Registra-se em tempo que a máquina utilizada não tem controle de avanço da ferramenta, nem dispositivo de proteção de curto circuito, melhoramentos estes que são sugeridos para trabalhos posteriores.



**Figura 4.7** - Vista Geral do Protótipo de ECM no início do trabalho, com a fonte de potência de 50 kWA

A **Figura 4.8** mostra o protótipo após a implementação das melhorias. Durante os testes foi identificado que as vibrações causadas principalmente pelo regime de escoamento do eletrólito, produzia golpes e afetava sobremaneira o avanço da ferramenta sobre a peça. Tornou-se mesmo causa de curto circuito em alguns testes preliminares.



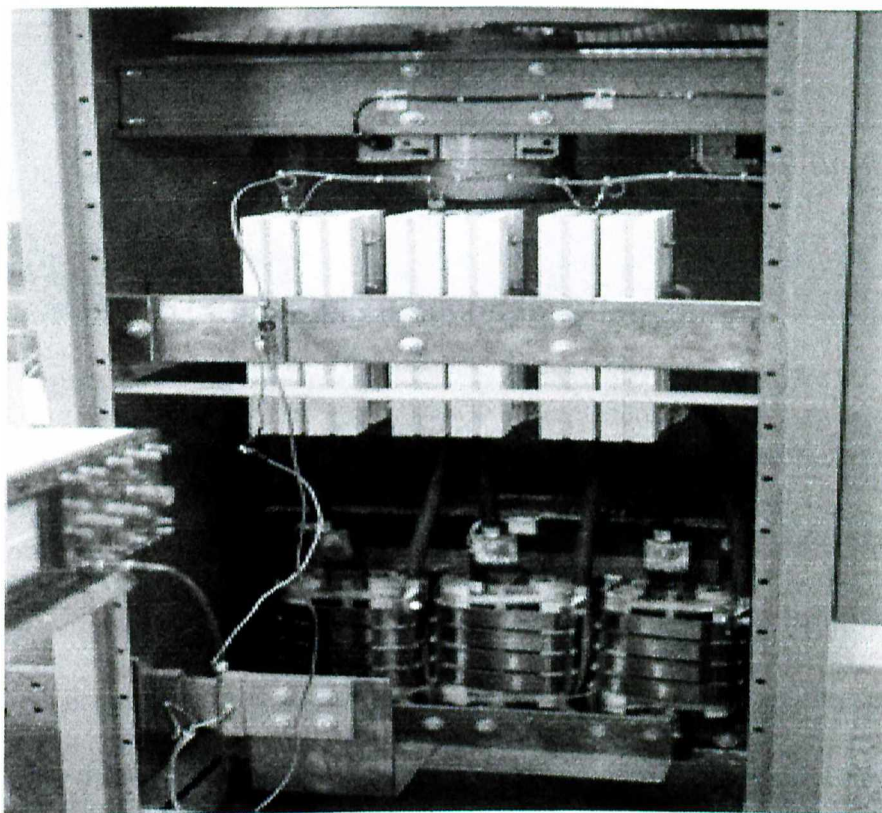
**Figura 4.8** - Vista do protótipo após implementação das melhorias

#### **-Característica da Nova Fonte de Potência**

Conforme mencionado, a primeira alteração introduzida foi a substituição da fonte de potência original, fonte para carregamento de baterias que dispunha de apenas duas tensões de saída 12V e 24V, e intensidade de corrente máxima de 200A (para um fator de utilização de 100%).

A nova fonte **Figura 4.9** usada neste trabalho, tem as seguintes características:

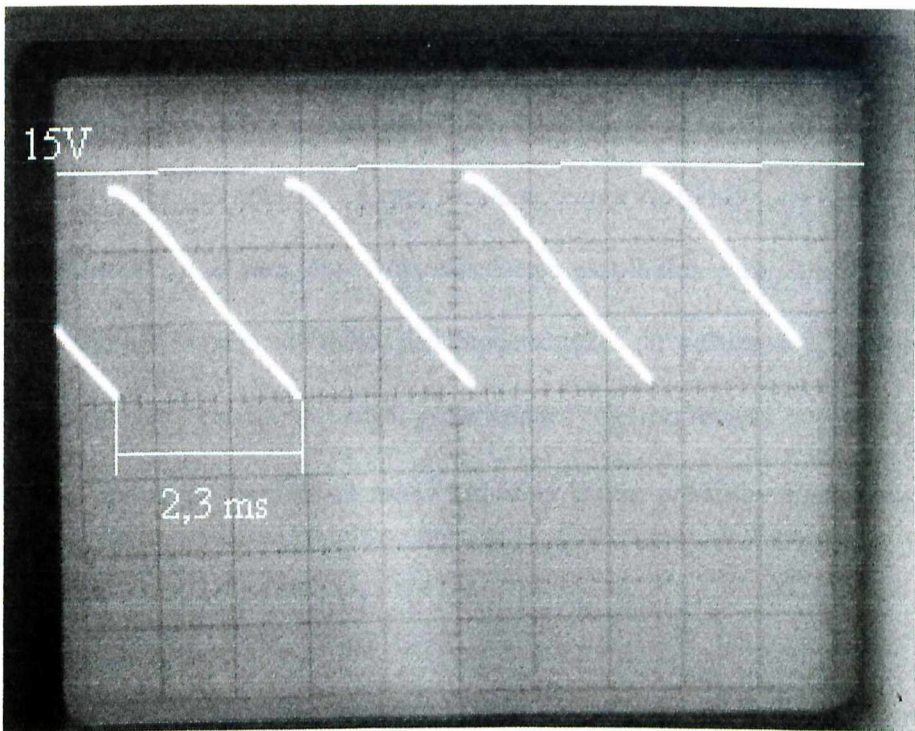
|                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| -Fabricante             | Rapid Powers (EUA)         |
| -Tipo                   | Tirestorizada              |
| -Fases no primário      | trifásica                  |
| -Tensão de entrada      | 220V                       |
| -Tipo de corrente       | corrente constante/pulsada |
| -Frequência             | 420 Hz (fixa)              |
| -Potência Máxima        | 50 kWA                     |
| -Tensão de saída (pico) | 3 - 25 Volts               |



**Figura 4.9** - Fonte de potência de 50 kWA, fabricada pela Rapid Powers (EUA)

**Figura 4.10** mostra a característica da onda para tensão de saída de 15 V a título de exemplificação. O uso da presente fonte foi bastante importante pois possibilitou a exploração da usinagem em faixas diferentes de tensão, assim como pelo fato de fornecer

uma corrente pulsada, o que se enquadra dentro das melhores condições de usinagem conforme abordado no capítulo 2.



**Figura 4.10** - Característica da onda para tensão pulsada fonte -15V

A onda pulsada cumpre um papel importante para com a eficiência do processo ECM. O fato da tensão oscilar entre zero e um valor de pico, permite que somente haja dissolução de metal quando a tensão for maior que o valor  $E_2$ , conforme abordado no capítulo 2. Em outras palavras pode se dizer que apenas um intervalo do período no caso (2,36 ms.), realmente ocorre remoção de material. Isto permite que haja renovação do eletrólito na interface de usinagem, entre pulsos consecutivos. Se por um lado a taxa de remoção de material conforme expressão 3.2 do capítulo 3, pois o intervalo de tempo efetivo de usinagem é menor do que o tempo total do processo, por outro lado a eficiência

de corrente ( $\eta$ ) melhora bastante pela diminuição das bolhas e do gradiente de temperatura entre entrada e saída do eletrólito, no “gap”.

#### 4.3 -Parâmetros Utilizados nos Ensaiois

Na **Tabela 4.1** tem-se agrupados os parâmetros usados nos ensaios. Apenas algumas combinações, no entanto, foram testadas com a finalidade de serem isoladas as causas dos resultados encontrados. Dois sais foram escolhidos para eletrólitos, ou seja o Cloreto de Sódio e o Nitrato de Sódio, nas concentrações da **Tabela 4.1**. A escolha destes eletrólitos recaiu em função de suas propriedades eletroquímicas e custo, conforme abordado no Capítulo 2. Ambos os sais adquiridos foram produtos comerciais, portanto sem controle de pureza.

Foram utilizadas várias concentrações em água, partindo das recomendações para a usinagem de aços de acordo com **Pandey [1985]** sumarizadas na **Tabela 2.1** no Capítulo 2, e **Metals Handbook [1984]**.

Os valores da tensão da fonte e velocidade de avanço da ferramenta foram extraídos de aplicações práticas relatadas por **Benedict [1987]**, onde se observa que foram usados 9,12 e 15 V para eletrólitos a wazzu base de NaCl e 12, 15 e 18 V para os eletrólitos a base de NaNO<sub>3</sub>. Como o NaCl é mais corrosivo que o NaNO<sub>3</sub>, foram experimentados avanços maiores para o primeiro (0,4 a 1,0 mm/min) e menores para o segundo (0,2, 0,4 e 0,6 mm/min). Os parâmetros relativos aos eletrólitos (pressão e vazão) foram baseados em aplicações industriais relatadas **Rumyantsev & Davidov [1989]**.

Tabela 4.1 - Parâmetros Utilizados nos Ensaios

| PARÂMETRO                     | ELETRÓLITO |     |     |             |     |     |                         |     |     |                         |     |                                      |     |
|-------------------------------|------------|-----|-----|-------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
|                               | NaCl-30%   |     |     | NaCl - 40 % |     |     | NaNO <sub>3</sub> - 20% |     |     | NaNO <sub>3</sub> - 30% |     | NaNO <sub>3</sub> - 20%<br>NaCl - 5% |     |
| TENSÃO DA FONTE ( Volt )      | 9          | 12  | 15  | 9           | 12  |     | 12                      | 15  | 18  | 15                      |     | 15                                   |     |
| AVANÇO DA FERRAMENTA (mm/min) | 0,6        | 0,6 | 1,0 | 0,4         | 0,6 | 1,0 | —                       | 0,2 | 0,6 | 0,2                     |     | 0,4                                  | —   |
| PRESSÃO DO ELETRÓLITO (MPa)   | 0,2        |     |     | 0,2         | 0,5 | 1,2 | 1,2                     | 1,1 | 0,2 | 0,8                     | 1,2 | 0,8                                  | 1,1 |
| VAZÃO ( l/hora)               | 800        |     |     | 80          | 60  | 18  | 180                     | 250 | 80  | 40                      | 18  | 400                                  | 250 |
|                               |            |     |     | 0           | 0   | 0   |                         |     | 0   | 0                       | 0   |                                      |     |

#### 4.4 - Ferramentais Utilizados

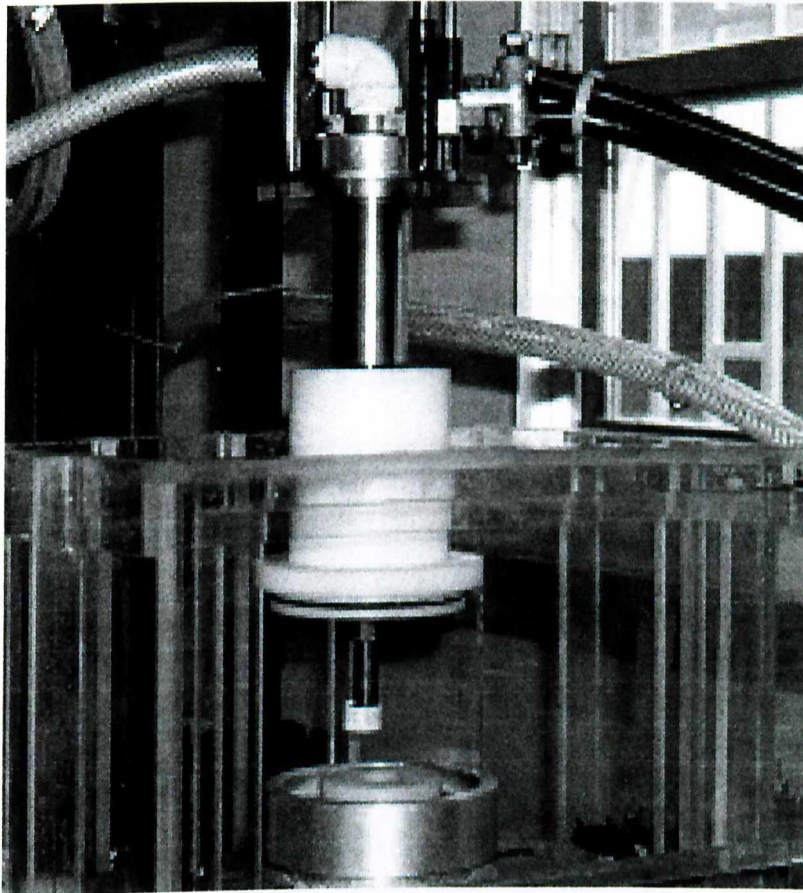
Conforme abordado anteriormente, são três os projetos de ferramentais apresentados neste capítulo. Os três ferramentais serão doravante descritos, e para tal serão denominados simplesmente por Ferramental n<sup>o</sup> 1, Ferramental e Ferramental n<sup>o</sup> 3.

- Ferramental n<sup>o</sup> 1 -

Este ferramental teve como princípio criar uma câmara que permitisse o controle de pressão na região de usinagem, uma vez que conforme abordado no capítulo 2, a pressão do eletrólito na interface de usinagem é de grande importância para com redução da formação de bolhas de hidrogênio. O Anexo I apresenta o desenho de conjunto deste ferramental.

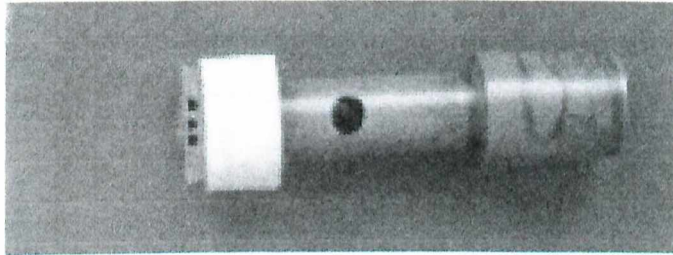
A peça a ser usinada uma vez inserida no rasgo lateral do posicionador ( ver desenho - item 7), foi montada na base (item 8) de maneira a assegurar o centro da ferramenta e delimitar

a área de usinagem . A câmara (item 4) permitiu o alinhamento do canhão porta-ferramenta, assegurando o confinamento do eletrólito na região de usinagem. O eletrólito, descendo pela passagem interna do canhão (este tubular) e da ferramenta, possui uma saída para o interior da pré-câmara através dos dois furos laterais da haste da ferramenta. O obturador (item 10), regulou a saída do eletrólito. A **Figura 4.11** mostra este ferramental montado no interior da cuba. Este ferramental tem com característica principal além da concepção de usinagem já descrita, a direção do fluxo de eletrólito, a qual tem a mesma direção do movimento da ferramenta.



**Figura 4.11** - Conjunto do Ferramental nº 1 usinagem montado na cuba e ferramenta com movimento de avanço paralelo a geratriz do entalhe.

Com esta câmara foram testados duas ferramentas, uma de cobre a qual recebeu dois tipos de revestimento lateral, inicialmente a base de resina de epoxi, e posteriormente de PVC rígido (**Figura 4.12**). Pode-se observar que esta ferramenta foi dotada de uma saída para eletrólito dirigido para o “gap” (três furos laterais de  $\phi$  2,5 mm, inclinados  $15^\circ$  para baixo).



**Figura 4.12** - Ferramenta de cobre com revestimento lateral de PVC

Uma ferramenta de Inox ABNT 304 foi também utilizada [**Figura 4.13**]. Esta ferramenta difere da anterior quanto a direção de injeção do eletrólito, ou seja, a injeção se deu para baixo diretamente e perpendicularmente a interface de usinagem.

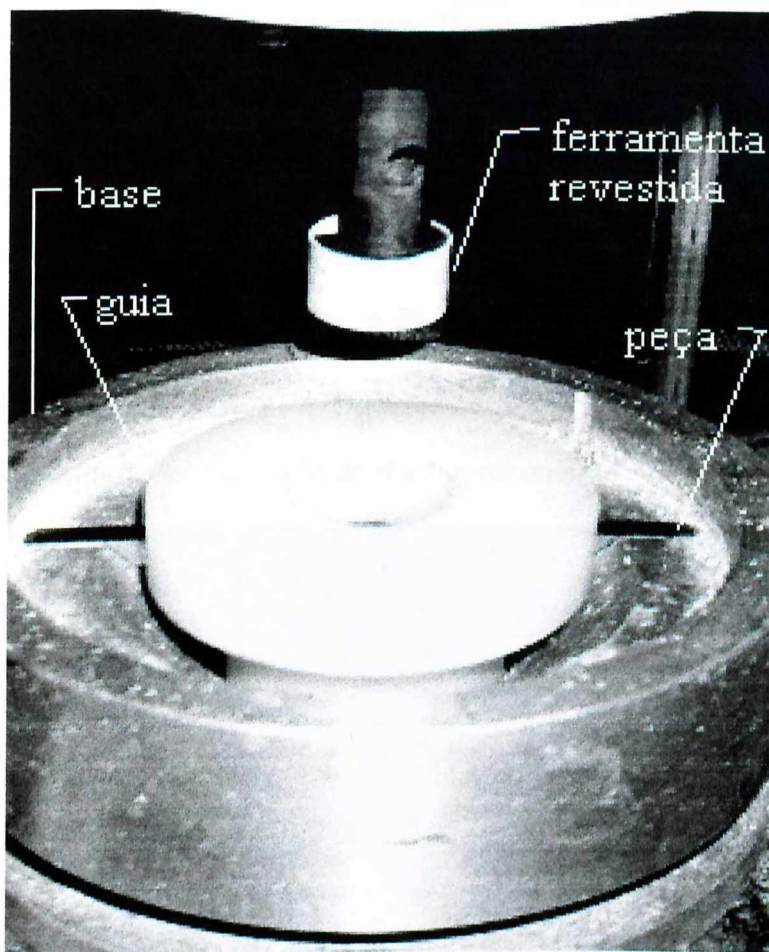


**Figura 4.13** - Ferramenta de aço inox ABNT 304.

Observa-se abertura de injeção de eletrólito



A **Figura 4.14** mostra a ferramenta da **Figura 4.12**, montada dentro da cuba eletrolítica, onde se vê a montagem desta à extremidade do canhão porta ferramenta.



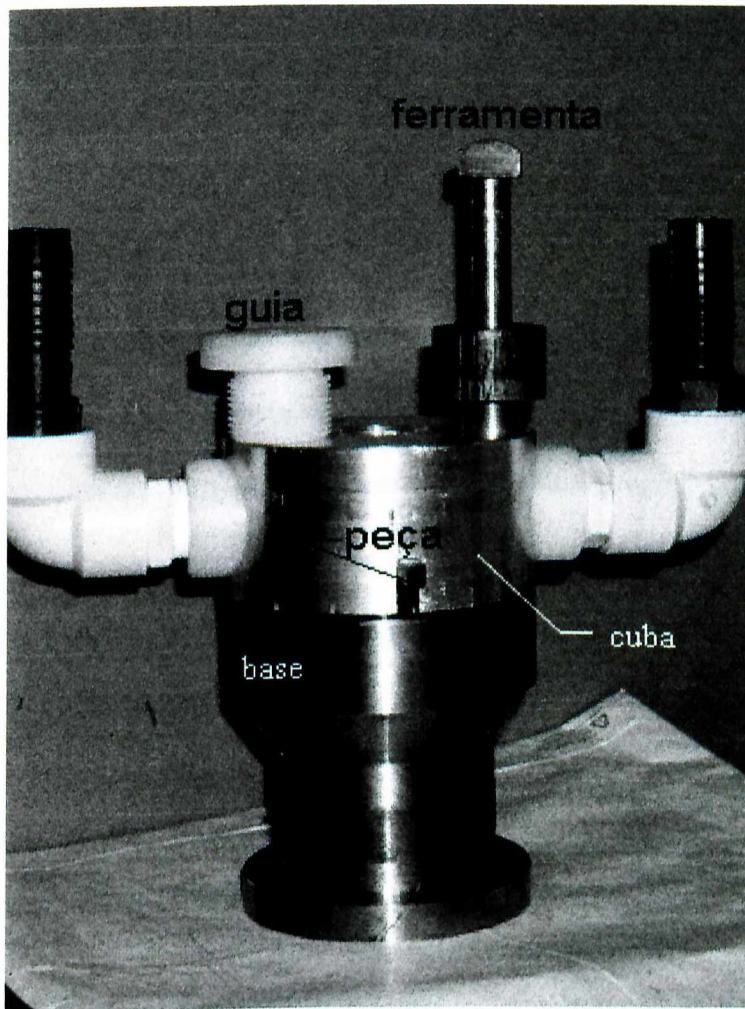
**Figura 4.14** - Detalhe da usinagem em câmara fechada

- **Ferramental nº 2** -

Este ferramental foi desenvolvido com base a partir dos resultados obtidos com o **Ferramental nº 1**, os quais estão apresentados e discutidos no próximo capítulo. O desenho de conjunto deste ferramental está no **Anexo II**, no final deste trabalho. Ratificando o que foi anteriormente dito, este ferramental tem como concepção básica o movimento da ferramenta perpendicular à geratriz do entalhe, e o fluxo de eletrólito

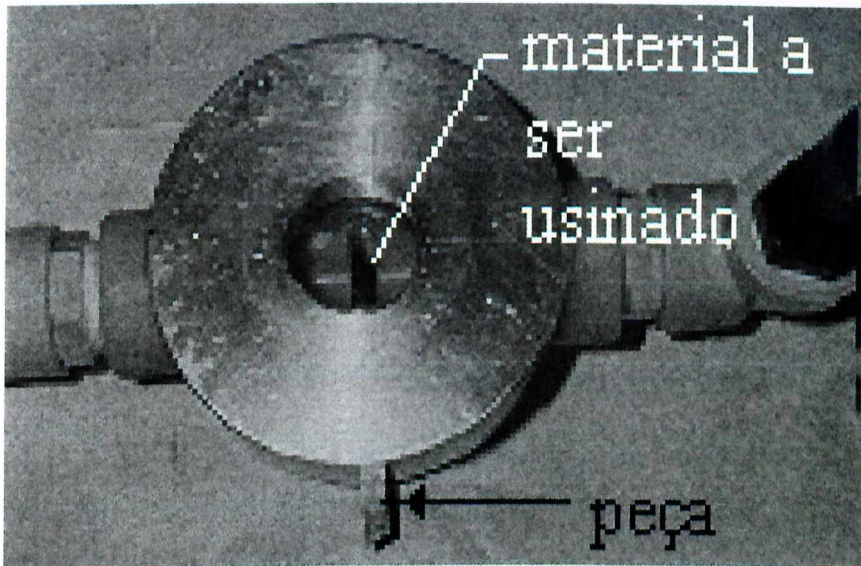
cruzando este sentido de movimento. Este aspecto foi fundamental para se estabelecer uma renovação eficaz do eletrólito dentro do “gap”.

Conforme pode ser visto no **Anexo II**, este ferramental é composto de uma câmara (item 5) inteiramente isolada no seu interior, que na parte superior posiciona a ferramenta por meio do guia (item 3). A peça, por sua vez montada no inserto (item 7) é montada no interior da câmara e fixada pelo bujão (item 9). O contato da peça foi feito por meio de cabos diretamente conectados a ela. A **Figura 4.15** mostra o conjunto deste ferramental. Vários materiais foram utilizados na fabricação do inserto (item 7), porém o que melhor resultado apresentou foi a borracha de silicone vulcanizada a frio.



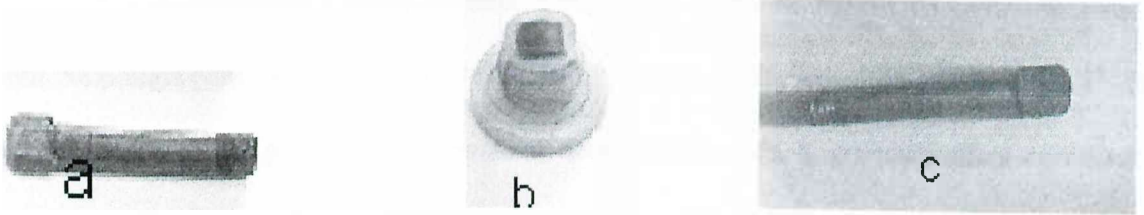
**Figura 4.15** - Conjunto do ferramental N° 2, para usinagem com movimento de avanço perpendicular a geratriz

A **Figura 4.16** mostra o interior da cuba, onde pode ser observado a câmara de usinagem expondo somente o material a ser usinado.



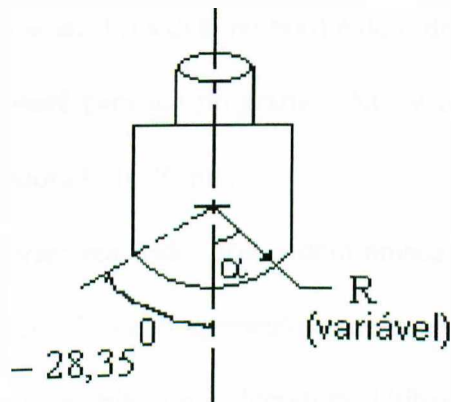
**Figura 4.16** - Detalhe da câmara de Usinagem

Vários testes foram realizados variando-se ferramentas, eletrólitos e concentrações de eletrólitos (estes conforme **Tabela 4.1**). As ferramentas apresentadas na **Figura 4.17** foram as mais conclusivas para com os resultados obtidos e que são apresentados no capítulo seguinte. A ferramenta identificada por (a) tem um raio constante na ponta de  $R=12,5$  mm. , e a ferramenta (b) tem na ponta a interpolação de três raios com o objetivo de diminuir o efeito de borda (f).



**Figura 4.17** - Três das ferramentas testadas com o ferramental nº 2 . **(a)** Ferramenta com raio de ponta constante  $R = 12,5 \text{ mm}$  ; **(b)** Ferramenta obtida com a interpolação de três raios ; **(c)** Ferramenta com raio de ponta variável

A ferramenta identificada por **(c)** foi desenvolvida com base na literatura **Rumyantsev & Davydov [1989]**, cujo raio de ponta é variável, e atende a seguinte expressão (1):



**Figura 4.18** - Perfil da ferramenta de cobre com raio de ponta variável

$$R = 12,5 - a_{ss} \cdot \sec \alpha \quad (4.1)$$

onde,

$a_{ss}$  = "gap" para a usinagem estática

$\alpha$  = ângulo medido a partir do centro do eixo de avanço da ferramenta.

Foi desenvolvida a curva segundo a expressão acima no Auto-CAD, “discretizada” em 56 pontos para  $-28,35^{\circ} < \alpha > 28,35^{\circ}$ , ou seja, em incrementos angulares de  $1^{\circ}$ . O Anexo III mostra o perfil da ferramenta desenvolvida para o processo ideal conforme Figura 4.18, que conforme Rumyantsev & Davydov [1989], deve ser tomado como ponto de partida para o desenvolvimento da mesma. Ainda no referido anexo temos em escala de ampliação as duas curvas, ou seja, a curva “plotada” para o raio variável da expressão (1) e o arco de circunferência de  $\Phi = 24,1$ . Este valor para o raio no centro do arco o qual, diga-se de passagem, foi o mesmo utilizado para a ferramenta da Figura 4.17 (b), foi obtido pela expressão (1) assumindo  $a_{ss} = 0,9 \text{ mm}$  (valor este obtido com ensaio experimental com uma ferramenta de raio de ponta constante e igual a 12,5 mm). Nota-se que o maior afastamento da forma ideal (medido no raio) é da ordem de  $f \approx 100 \text{ }\mu\text{m}$ . Foram transferidos os dados sobre o perfil para um programa CNC, e o perfil da ferramenta foi usinado em cobre em uma fresadora CNC Romi.

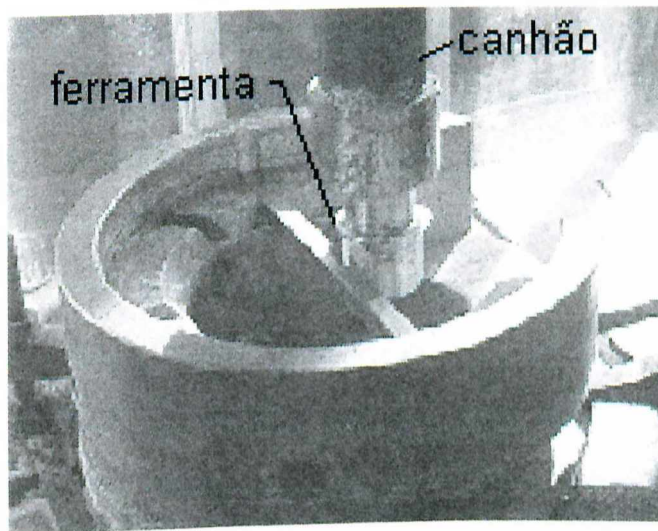
Com este ferramental foram realizados testes com ambos eletrólitos, cloreto de sódio e nitrato de sódio. O nitrato de sódio apresentou uma taxa de remoção de material substancialmente menor, o que concorda com a literatura. Utilizou-se ainda uma solução mista dos dois eletrólitos que consta da Tabela 3.1, com o objetivo de aumentar a eficiência da corrente.

Os resultados convergiram nesta fase dos testes, como será tratado no próximo capítulo, porém ocorreram curtos circuitos e pequenas descargas elétricas. A ocorrência de curtos com a ferramenta em avanço contínuo, foi atribuído a inexistência de um sistema de controle do “gap”, e levou a testar a ferramenta descrita acima em usinagem estática. Desta forma a ferramenta permaneceu estática durante os períodos de usinagem, alternando-se períodos de usinagem e de reposicionamento do “gap”. Foi empregado como

eletrólito o nitrato de sódio em concentração de 20%, injetado com uma pressão de 0,8 a 1,2 Mpa (para uma vazão média da ordem de 500 l/h), parâmetros estes escolhidos com base nos melhores resultados dos testes anteriores. A tensão da fonte utilizada foi de 12 V.

- Ferramental Nº 3 -

A **Figura 4.19** mostra uma ferramenta com a mesma concepção de usinagem descrita acima, ou seja, com movimento da ferramenta paralelo a geratriz do entalhe, em câmara aberta, injetando portanto, o eletrólito diretamente na interface de usinagem .



**Figura 4.19** - Ferramenta de usinagem em câmara aberta, montada no canhão de usinagem

A eliminação do revestimento lateral, foi substituído por um rebaixo no diâmetro da ferramenta, explorando-se assim o fato da queda de tensão que ocorre com o aumento do “gap”, conforme [Rumyantsev & Davydov, 1989]. Ratifica-se assim o do comportamento deste eletrólito comparado ao NaCl, o qual confina melhor as reações anódicas.

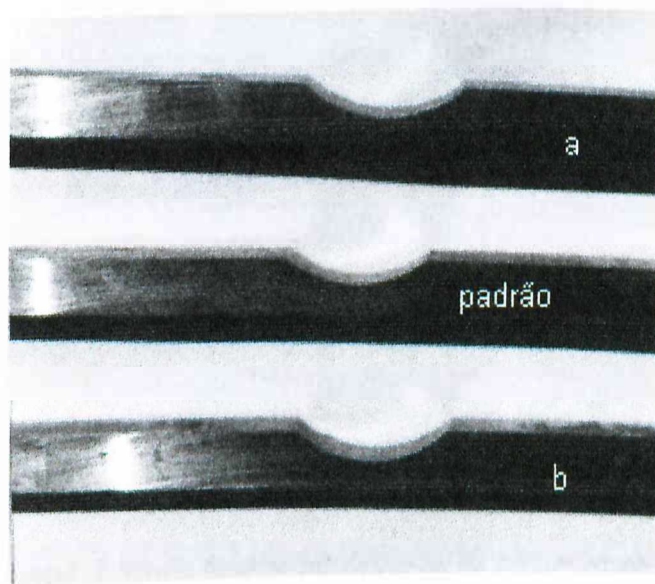
O eletrólito utilizado foi o  $\text{NaNO}_3$  em **20%** e **30%** de concentração e tensão de fonte ajustada para de **12, 18 e 25 Volts**. Foi empregada uma velocidade de avanço de **0,2 mm/min** no teste desta última versão.

## 5 - RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos, primeiramente, os resultados mais expressivos obtidos neste trabalho sob o ponto de vista da acuracidade de forma; e a seguir os demais resultados extraídos dos testes com os três ferramentais descritos no **Capítulo 4**. Posteriormente serão apresentados alguns resultados e observações extraídos dos testes preliminares, os quais poderão ser úteis para a continuidade desta pesquisa e trabalhos futuros.

### 5.1 - Melhores Resultados Obtidos para com a Acuracidade de Forma

Os melhores resultados dos testes experimentais foram obtidos com o **Ferramental nº 2**. Os dois melhores resultados deste trabalho foram obtidos com a ferramenta de raio de ponta corrigido e variável, descrita no **Capítulo 4**, utilizando como eletrólito  $\text{NaNO}_3$  a 20%. A usinagem foi realizada de maneira estática com o restabelecimento periódico no “gap”.



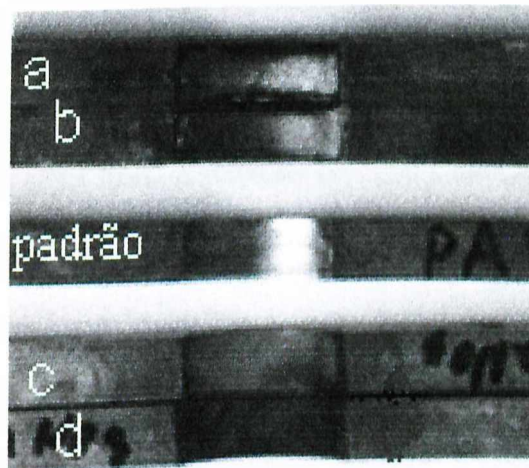
**Figura 5.1** - Peças usinadas com  $\text{NaNO}_3$  comparadas com a peça padrão;



O desvio de forma para a peça (b), o melhor de todos resultados, medido via projetor de perfil, foi de  $f = 0,1 \text{ mm}$  para o lado de entrada do eletrólito e  $f = 0,25 \text{ mm}$  para o lado de saída do eletrólito.

A **Figura 5.1** apresenta estas peças vistas de perfil e comparadas a peça (padrão ao centro). Estes mesmos resultados podem ser vistos por cima na **Figura 5.2 (c) e (d)**, a qual inclui também os dois melhores resultados (a) e (b) obtidos na usinagem com o  $\text{NaCl}$ . Estas duas peças identificadas por (a) e (b) foram usinadas utilizando tensões de fonte de **15 e 18 V**, e pressão do eletrólito de **0,8 MPa**. Já as peças (c) e (d) foram usinadas com  $\text{NaNO}_3$  com uma tensão de fonte de **12V** e pressão de eletrólito de **1,1 Mpa**.

O melhor resultado na usinagem com  $\text{NaCl}$  apresentou um desvio de forma  $f = 1,7\text{mm}$ , para ambos os lados (entrada e saída do eletrólito).



**Figura 5.2** - Melhores resultados com peças usinadas: (a) e (b) com  $\text{NaCl}$  e ferramenta com perfil corrigido; (c) e (d) com  $\text{NaNO}_3$  e raio de ponta variável.

O **Ferramental 2** foi de grande importância na obtenção destes resultados, pois permitiu a usinagem com as pressões mais altas que o equipamento de usinagem

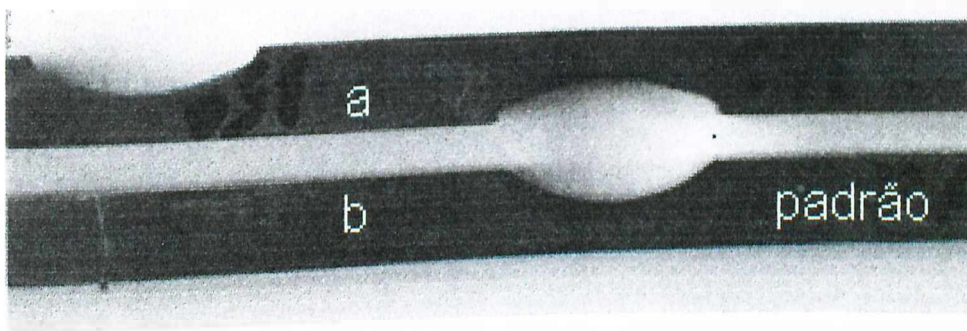
eletroquímica pode oferecer. Houve considerável redução das bolhas. Embora a taxa de remoção de material não pudesse ser avaliada nestes testes uma vez que os mesmos foram realizados de maneira intermitente, esta foi a forma que trouxe os melhores resultados para com a acuracidade de forma. A usinagem com avanço contínuo foi ainda utilizada na usinagem das peças da **Figura 5.2 (a) e (b)**.

Devido a ocorrência de curtos circuitos, experimentou-se iniciar a usinagem com uma tensão inicial da fonte maior (na ordem de **18 Volts**), com a finalidade de romper as camadas de óxidos existentes, embora saiba-se que isto é mais eficiente para com o anodo. Entretanto, nos testes feitos no decorrer deste trabalho, esta prática mostrou-se eficaz também no catodo. Acredita-se que as reações que ocorrem no “gap” e a evolução do pH nesta região, contribuam para que ocorram reações de redução no catodo. Entretanto, após 5 segundos de usinagem a tensão da fonte foi ajustada para o valor planejado para o teste.

Em alguns testes realizados, observou-se que com o movimento de avanço contínuo da ferramenta contra a peça havia a redução do “gap”, sem que houvesse aumento da corrente, até a ocorrência de curto circuito. A passivação das reações na interface dos eletrodos quando o eletrólito utilizado foi o nitrato de sódio principalmente, não permitiu o aumento da corrente e conseqüente aumento da taxa de remoção de material. Isto evitaria a ocorrência de curto circuito. Experimentou-se aumentar a tensão por um curto período (aproximadamente por 5 segundos) toda vez que a tensão de referência tomada no Shunt permanecesse baixa, a despeito do avanço da ferramenta, o que denotava redução do “gap”. Com este procedimento evitaram-se curtos circuitos, o que pode ser atribuído à quebra da camada de passivação pelo aumento da tensão. Isto fato leva a se propor uma sobreposição de sinal de corrente alternada de maior tensão de pico que a da fonte principal, ou simplesmente um aumento no pico da tensão pulsada por descarga de

capacitor em intervalos espaçados (por exemplo: 30 seg.). Acredita-se que possa trazer bons resultado e provavelmente maior taxa de remoção de material. A literatura consultada na elaboração deste trabalho não menciona uso de sinal sobreposto.

O resultado apresentado na **Figura 5.3 (a)** foram com o eletrólito **NaCl**. A concentração utilizada nestes testes foi de **40%** e parâmetros foram tensão de fonte **12V**, avanço **0,6 mm/min** e pressão do eletrólito **1,2 MPa**.



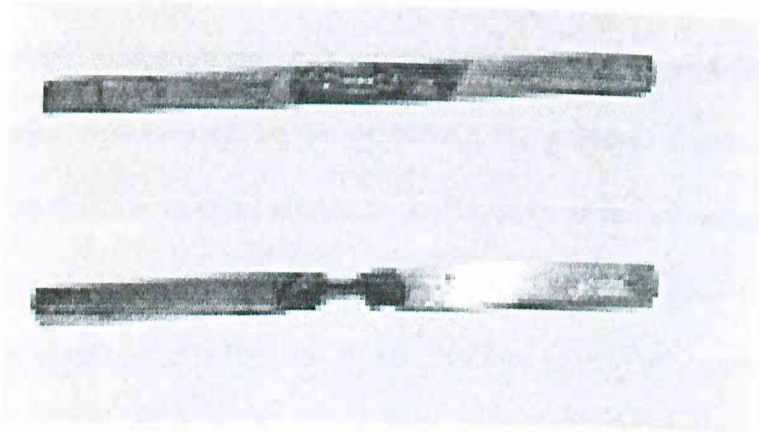
**Figura 5.3** - Comparação visual de um entalhe usinado com NaCl com a peça padrão; (a) Peça com dois entalhes usinados; (b) Entalhe padrão.

Como pode ser observado, o sobrecorte foi bastante acentuado. Houve defeitos de superfície do tipo estrias e ondulações, entretanto a saída brusca nas extremidades do entalhe foi o defeito mais notável e não verificado quando se utilizou o  $\text{NaNO}_3$ .

## 5.2 - Resultados Obtidos com o Ferramental nº 1

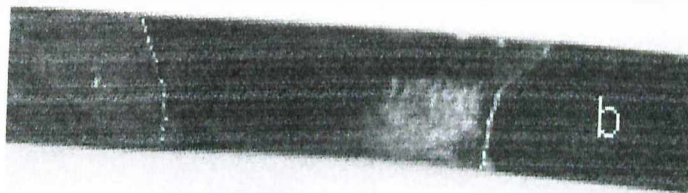
Os testes com este ferramental foram realizados com uso das ferramentas da **Figura 4.12** e **Figura 4.13**. Nos testes realizados com a ferramenta de aço inox da **Figura 4.13**, ocorreram muitos curtos circuitos que impediram a conclusão das usinagens. Já com a ferramenta de cobre as mesmas puderam ser concluídas. A **Figura 5.4** apresenta duas

peças usinadas com esta ferramenta da **Figura 4.13**, as quais tiveram a usinagem interrompida devido a curtos circuitos.



**Figura 5.4** - Peças com usinagem não concluída devido a curtos circuitos

A **Figura 5.5** apresenta uma peça usinada com a ferramenta de cobre da **Figura 4.12**, cuja usinagem pode ser concluída. Nota-se que houve sobrecorte em ambos lados, embora mais acentuado do lado de entrada do eletrólito (superior na foto). Mesmo com o revestimento lateral, houve refluxo do eletrólito (para cima), e a maior condutividade elétrica do NaCl (único eletrólito utilizado com este ferramental), causou este sobrecorte.



**Figura 5.5** - Peça usinada com a ferramenta de cobre revestida de PVC

### 5.3 - Resultados Obtidos com o Ferramental n<sup>o</sup> 3

Os testes com este ferramental foram realizados somente com  $\text{NaNO}_3$ . Poucas foram as usinagens que puderam ser concluídas, uma vez que ocorrerão muitos curtos circuitos nos testes. Por esta razão testou-se apenas velocidades de avanço pequenas  $v_k = 0,2$  e  $0,4$  mm/min. Com isto a usinagem foi bastante demorada e interrompida várias vezes, o que causou um acentuado sobrecorte nas peças que tiveram a usinagem concluída. Partículas de sujeira de tamanho considerável, ao se prenderem na interface lateral da ferramenta provocaram macro defeitos ao se prenderem na interface lateral da ferramenta..

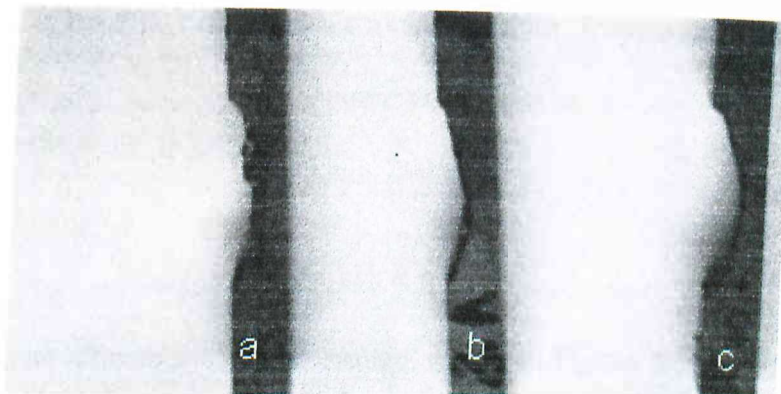
Ficou claro nos testes com este ferramental que a ECM nas condições testadas neste trabalho, deve ser feita com uma lavagem eficiente na interface de usinagem, com controle da pressão e limpeza do eletrólito. Por outro lado, o emprego do  $\text{NaNO}_3$  requer alguma forma de monitoramento do “gap”.

#### 5.4 - Resultados dos Testes Preliminares

Nos testes com o **Ferramental nº 1** foi utilizado como ponto de contato do anodo, e portanto da peça, a chapa de cobre que compõe a base da cuba do protótipo, na qual conectam-se quatro cabos de  $80\text{mm}^2$  ligados ao polo positivo da fonte. Identificado o mal contato entre a base do ferramental a base da cuba, o contato passou a ser feito diretamente na peça usinada por meio de dois cabos auxiliares. Esta é a recomendação da literatura [Rumyantsev & Davydov, 1989], que diz que as conexões devem ser o mais próximo dos eletrodos.

A **Figura 5.6** mostra três peças usinadas em câmara aberta, com a ferramenta avançando perpendicularmente à geratriz do entalhe, utilizando o  $\text{NaCl}$  em concentração de 30% como eletrólito. Observa-se que houve um acentuado efeito de borda, o que desviou a geometria bastante do padrão adotado. Na **Figura 5.6 (a)** a tensão da fonte foi

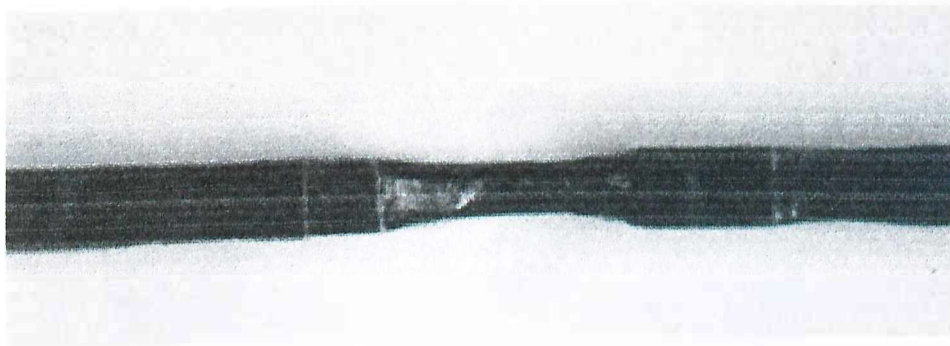
de 18 V, e o avanço da ferramenta foi de 0,44 mm/min. Já na Figura 5.6 (b) a tensão foi de 15V e o avanço da ferramenta foi de 0,44 mm/min. A Figura 5.6 (c), o melhor resultado conforme pode ser observado, foi obtido com tensão de 12 V e velocidade de avanço da ferramenta de 0,6 mm/seg.



**Figura 5.6** - Peça usinada em câmara aberta, com superfície muito irregular

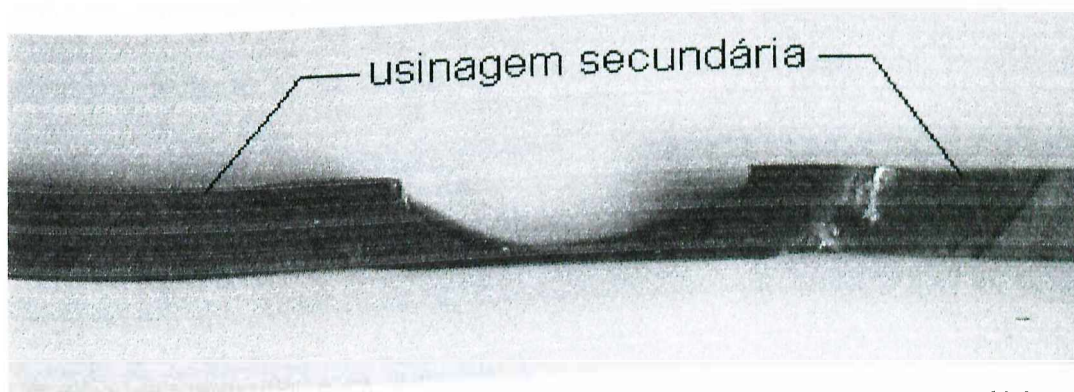
Houve um início de furo na região onde o jato incidiu com maior intensidade, o que pode ser observado na peça identificada por (a). As Figuras 5.6 (a) e (b) apresentam uma geometria muito irregular o que pode ser atribuído a tensão de fonte mais alta, velocidade de avanço da ferramenta baixa, e a vazão do eletrólito alta. A maior taxa de remoção de material obtida na peça “c” e o uso de uma tensão de fonte mais adequada e menor vazão, fez com que a geometria obtida fosse menos irregular que nos casos anteriores.

Na Figura 5.7 tem-se uma outra peça produzida nesta mesma fase, utilizando outro projeto de ferramenta, tensão de 12 V e avanço de 0,6 mm/ min. Houve muitas irregularidades na superfície e remoção de material na lateral da peça, uma vez que o jato do eletrólito de NaCl não ficou confinado à área de usinagem.



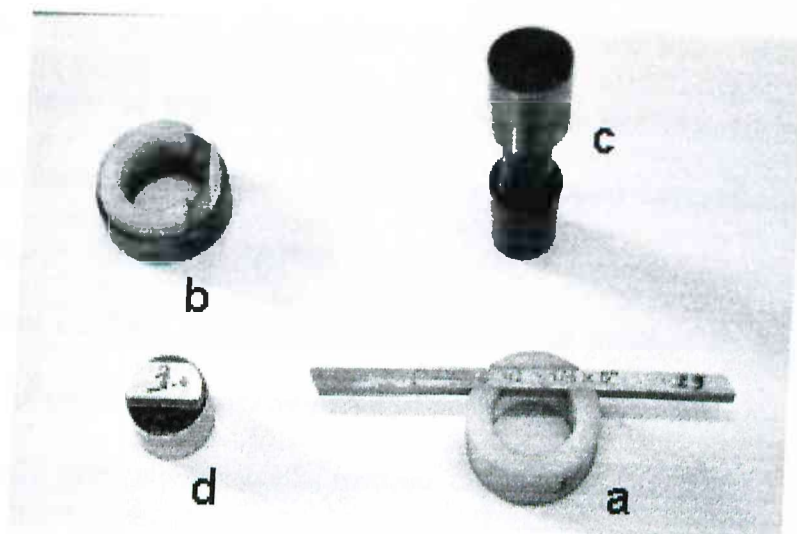
**Figura 5.7** - Peça usinada em câmara aberta . Observa-se acentuada remoção de material nas laterais

A peça apresentada na **Figura 5.8** foi usinada nesta fase de pré-testes, com a ferramenta da **Figura 5.9 (d)** e utilizando o guia da **Figura 5.9 (b)**. O eletrólito utilizado foi a solução aquosa de **NaCl a 30%**, e a tensão da fonte foi de **12 V**. Este guia, conforme pode ser observado na figura, possui um luva de aço externa o que o difere do guia da **Figura 5.9 (a)**.



**Figura 5.8** - Peça usinada em câmara aberta, apresentando usinagem secundária

Esta luva que reveste o guia da **Figura 5.9 (b)**, provocou usinagem secundária na área planejada, conforme pode ser observado na peça da **Figura 5.8**. A corrente elétrica passando externamente a parede do guia provocou a ranhura adjacente ao entalhe.



**Figura 5.9** - Ferramentas utilizadas nos testes preliminares; (a) guia de nylon; (b) guia reforçado com luva de aço; (c) ferramenta de aço ABNT 304 ; (d) ferramenta de cobre revestida de PVC

Analisando este resultado, pode-se concluir que a boa condutibilidade elétrica da solução de NaCl possibilitou que se estabelecesse uma tensão entre a luva e a peça, suficiente para que houvesse dissociação metálica, o que condiz com a abordagem feita no capítulo 2 sobre as características deste eletrólito . Baseado neste fato, recomenda-se o isolamento elétrico da câmara de usinagem, e o confinamento do material a ser usinado. Este resultado foi de muita importância para o desenvolvimento do **Ferramental nº 2**. Outro aspecto que também pode ser observado é o sobrecorte lateral, o qual foi acentuado em todos os testes realizados com o NaCl.

Entre os materiais testados na elaboração dos ferramentais, os materiais sintéticos utilizados principalmente na fabricação da câmara, foram os que mostraram melhores resultados. Entretanto o emprego destes materiais é possível desde que a conexão dos polos se dê o mais próximo dos eletrodos.



Considerando o problema de corrosão a que os materiais metálicos estão sujeitos, concluiu-se deste trabalho que materiais do tipo alumínio, latão e mesmo aços, são aceitáveis quando se trata de realizar testes de curta duração, ou seja em pesquisa laboratorial. Porém, quando uma grande quantidade de testes forem efetuados, recomenda-se o emprego de aço inox ou plásticos de engenharia na fabricação da câmara de usinagem. Ressalva deve ser feita quanto ao comportamento dos plásticos de engenharia quando usinado ou submetido a pressões maiores durante os testes. Em operações de torneamento e fresamento, o nylon 6 por exemplo, mostrou dificuldade na obtenção de precisão e bom acabamento superficial, principalmente devido ao aumento de temperatura durante a operação de usinagem.

Por outro lado, câmaras ou furos de passagem do eletrólito ou de montagem do eletrodo ferramenta (usinados no nylon 6), deformaram-se sob pressão causando problemas de estanqueidade durante os testes. Recomenda-se, portanto, que as partes que se montam no conjunto do ferramental de usinagem sejam projetadas com vedação do tipo "O'ring" ou mesmo retentores de lábio. Por esta razão, no projeto da câmara do **Ferramental 2** foi utilizado um bloco de alumínio com inserção de um tarugo de nylon prensado no seu interior. Entretanto, pequenas áreas internas do metal (alumínio) que ficaram expostas aos vazamentos que ocorreram durante os testes foram atacadas, principalmente quando o eletrólito usado foi o cloreto de sódio.

## 6 - CONCLUSÕES

As principais conclusões que podem ser tiradas deste trabalho, são:

- O desempenho da usinagem eletroquímica, medido em termos da taxa de remoção de material e acuracidade de forma, depende da qualidade do equipamento principalmente no tocante à sua rigidez estrutural. Depois que o equipamento foi melhorado com o enrigecimento da coluna e do porta-ferramenta, os resultados da acuracidade, mormente nos casos de ferramental em câmara fechada, foram significativamente melhorados;
- A rigidez do equipamento, em função dos elevados níveis de vibrações que pode atingir a ferramenta nos caso de altas pressões e vazão do fluido eletrolítico, desempenha papel preponderante na prevenção de curtos circuitos. Desta forma, toda a atenção deve ser dispendida no sentido de maximizar a rigidez dinâmica da máquina eletroquímica;
- Os eletrólitos á base de NaCl, em qualquer concentração, não são adequados para a usinagem do aço ABNT M2. Se por um lado estes eletrólitos apresentaram, quase sempre, independentemente dos demais parâmetros e ferramentais, altas taxas de remoção, por outro lado, causaram grandes desvios de forma;
- Os eletrólitos à base de NaNO<sub>3</sub>, principalmente nas concentrações de 15% e 20%, apresentaram baixas taxas de remoção mas elevados níveis de acuracidade de forma para o aço ABNT M2;
- A limpeza do eletrólito mostrou ser um aspecto decisivo no desempenho da usinagem eletroquímica, em função, principalmente, da presença de grandes partículas que impediram, em muitos ensaios, a passagem do eletrólito em região localizadas na interface ferramenta-peça deixando de remover, nas referidas regiões, o material . As consequencias de tal evento, é em alguns casos curtos circuitos e em outros defeitos no acabamento ou na forma geométrica da peça;

- O parâmetro fluidodinâmico que se mostrou mais influente no desempenho da usinagem eletroquímica foi a pressão do eletrólito, nos casos de ferramentais com câmara fechada. Os melhores resultados foram obtidos faixa de 0,8 a 1,2 MPa.
- A vazão do eletrólito demonstrou não ser significativa no desempenho do processo. Somente em casos de vazões muito baixas, iguais ou menores que 250 l/h, foram observados curtos circuitos frequentes e, em alguns casos, valores muito baixos da TRM;
- Ficou evidenciado, em todos os ensaios executados com a ferramenta em avanço constante, a importância de um servosistema de monitoramento contínuo do “gap”. A inexistência de tal mecanismo, pode-se dizer, foi um das principais causas de dificuldade de obtenção de níveis razoáveis de acuracidade de forma, na maioria dos ensaios;
- Ficou evidenciado a veracidade de uma afirmativa presente na maioria dos trabalhos consultados: a de que maiores TRM redundam, quase sempre, em melhores acabamentos e acuracidade de forma. Isto pode ser constatado tanto nos casos de ferramentais em câmara fechada ou aberta, quando foi observado que avanços constantes maiores da ferramenta redundaram em melhores acuracidades de forma;
- Os melhores resultados obtidos na usinagem do aço ABNT M2, o foram com ajuste da tensão da fonte na faixa de 12 a 15V para eletrólitos a base de  $\text{NaNO}_3$ , e de 9 a 12 V para eletrólitos a base de  $\text{NaCl}$ ;
- Os melhores ferramentais foram os de câmara fechada (e com o sistema de lavagem cruzado ao movimento da ferramenta), por permitirem melhor controle do jato eletrolítico, e por restringir a usinagem à área planejada;
- As ferramentas com melhores isolamentos elétricos são mais eficientes, tanto no aspecto da taxa de remoção de material como no aspecto da acuracidade de forma; superfícies

metálicas do ferramental, ou conexões de cabos próximos a área de usinagem e imersos em eletrólito, devem ser evitados pois provocam usinagem secundária;

- A precisão geométrica do ferramental deve propiciar um regime de escoamento do eletrólito na interface, o menos turbulento possível, que nos testes realizados mostrou ser fator determinante para com a acuracidade de forma.

Em função das experiências vivenciadas no presente trabalho, sugerem-se os seguintes trabalhos na continuidade da linha de pesquisa com o aço ABNT M2:

- Melhorar a máquina eletroquímica, usada neste trabalho, incorporando um servomecanismo para controle automático do “gap” e dotando a com um circuito eletrolítico com melhor sistema de limpeza do eletrólito;
- Estudar a influência do estado da limpeza do eletrólito no desempenho da usinagem eletroquímica para diferentes eletrólitos;
- Estudar a concentração mais adequada de eletrólitos, notadamente as concentrações de  $\text{NaNO}_3$  a 15%;  $\text{NaNO}_3$  a 20%;  $\text{NaNO}_3$  a 25%;  $\text{NaNO}_3$  a 30 % ;  $\text{NaNO}_3$  a 15% +  $\text{NaCl}$  a 5% e  $\text{NaNO}_3$  a 20% +  $\text{NaCl}$  a 5%;
- Estudar a influência da sobreposição de um sinal elétrico, sobre a taxa de remoção de material e acuracidade de forma;
- Estudar a influência da velocidade do eletrólito na acuracidade de forma.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Bhattacharyya, A.**, *New Technology*, The Institution of Engineers, India, 1971.

**Benedict, G.F.**, *Nontraditional Manufacturing Process*, New York, Marcel Dekker, 1987.

**Chuchro, M., et al, K** *The Influence of Electrochemical Dissolution Process Conditions on Machined Surface Geometry*, ISEM XI - International Symposium for Electromachiningwazzu , , pgs 521-531, Lousanne, Swiss, 1995.

**Cruz, C. ,** *Há Inúmeras Maneiras Não-Tradicionais de Usinar Materiais. Conheça Algumas*, São Paulo, Revista Máquinas & Metais, pgs 80-85, 1995.

**Dabrowski, L. et al**, *The Effect of Parameters of Electrochemical Machining (ECM) and Structure of Material on Machined Surface Roughness*, 3<sup>o</sup> International Techno-Scientific Conference on “Influence of Production Engineering on State of the Surface Layer”, Poland, 1996.

**Datta,M. et al ,** *Recent Advances in the Study of Electrochemical Micromachining*, ASME - PED - Vol. 64. Manufacturing Science and Engineering (Ed.K.F.Ehmann) pp. 675-692, 1993.

**De Reget C.**, *ECM for the Production of High Precision Components*, International Symposium of Electromachining ISEM - 8, Moskow, 1986.

**Field, M. & Kahles, J.F. & Koster, W.P.**, *Surface Finish and Surface Integrity - Metals Handbook - 9<sup>th</sup> Edition*, - Vol.16 -Machining, 1989.

**Jain, V. & Rajurkar, K.P.**, *An Integrated Approach for Tool Design in ECM*, *Precision Engineering*, Butterworth-Heinemann, 1991.

**Kozak, J. et al** , *Computer Simulation of Numerically Controlled Electrochemical Machining with a Spherical Tool Electrode*, 11th International Conference on Computer-Aided Production Engineering, London, 1995.

**Kozak, J., et al** , *The Effect of Electrochemical Dissolution Characteristics on Shape Accuracy in ECM*, ISEM XI - International Symposium for Electromachining, , pgs 511-519, Lousanne, Swiss, 1995.

**Kozak, J., et al**, *Accuracy Problems of the Pulse Electrochemical Machining*, 22nd International Machine Tool Design and Research Conference, Manchester, 1981.

**Lima, F.E.**, *Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas*, Dissertação de Mestrado, UFU, 1997.

- Malaquias, E.S.**, *Contribuição para o Desenvolvimento de um Protótipo de um Equipamento de Usinagem Eletroquímica*, Dissertação de Mestrado, UFU, 1996.
- Marty, C.**, *Usinages Par Procédés Non Convencionnels*, Masson, Paris, 1971.
- McGeough, J.A.**, *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall, London, 1988.
- Metal's Handbook**, *Nontraditional Machining*, Nona Edição, Volume 16, 1989.
- Pandey, P.C. & Shan, H.S.**, *Modern Machining Process*, Tata McGraw Hill, New Delhi, 1985.
- Rajurkar, K.P., et al**, *Modeling and Monitoring Gap in Pulse Electrochemical Machining*, Manufacturing Technology, Annals of the Cirp, pp. 177-186, 1995.
- Rapid Power**, *Manufacturing Powers Suppliers*, User's Manual , Brookfield, USA, 1994.
- Risko, D.**, - *Electrochemical Machining- Innovative Solutions for Higher Productivity*, SME Technical Paper, 1990.
- Rumyantsev, E., Davydov, A.**, *Electrochimical Machining of Metals*, Mir Publishers, Moscow, 1989.

**Snoeys,R. et al**, *Current trends in Non Conventional Material Removal Processes*, CIRP Annals, Vol. 35/2, 1968.

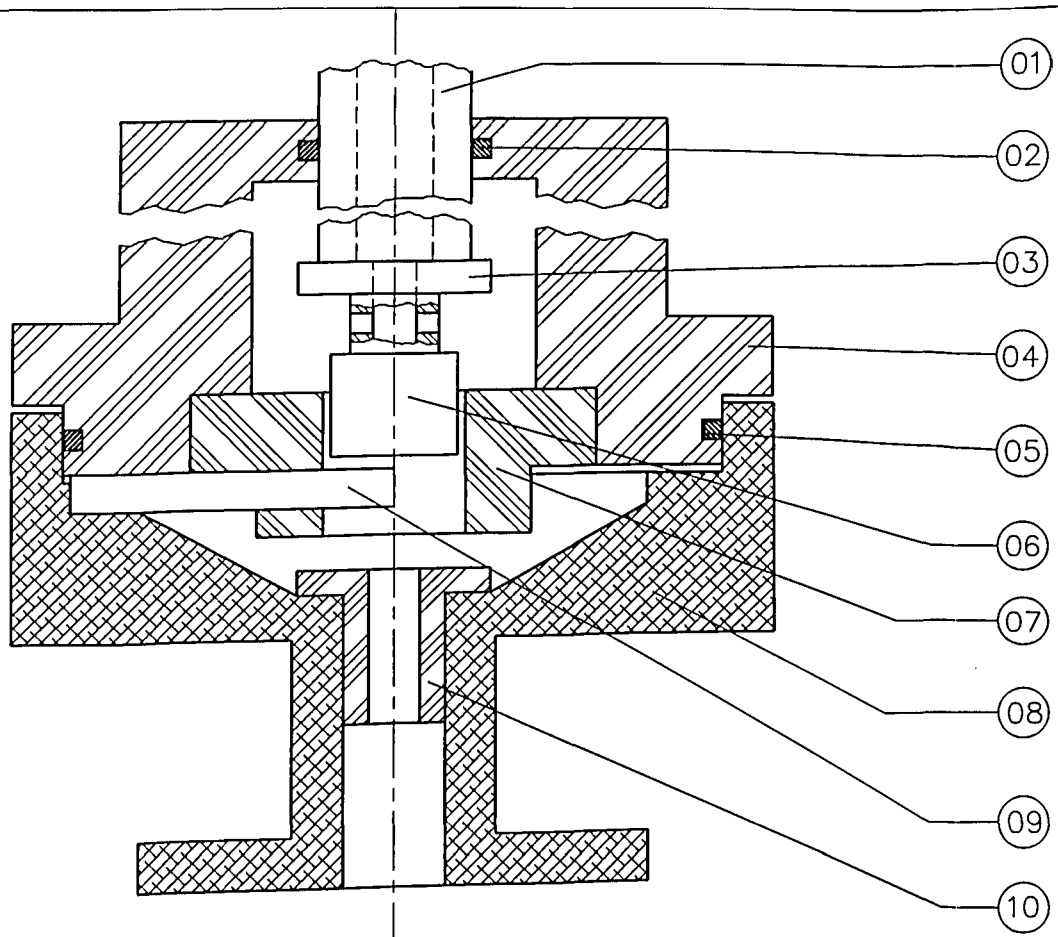
**Weller**, *SME - Society Manufacturing Engineer ; Nontraditional Processes*, Second Edition, Deaborn, 1984.

**Wilson, J.F.**, *Practice and Theory of Electrochemical Machining*, Wiley, New York, 1971.

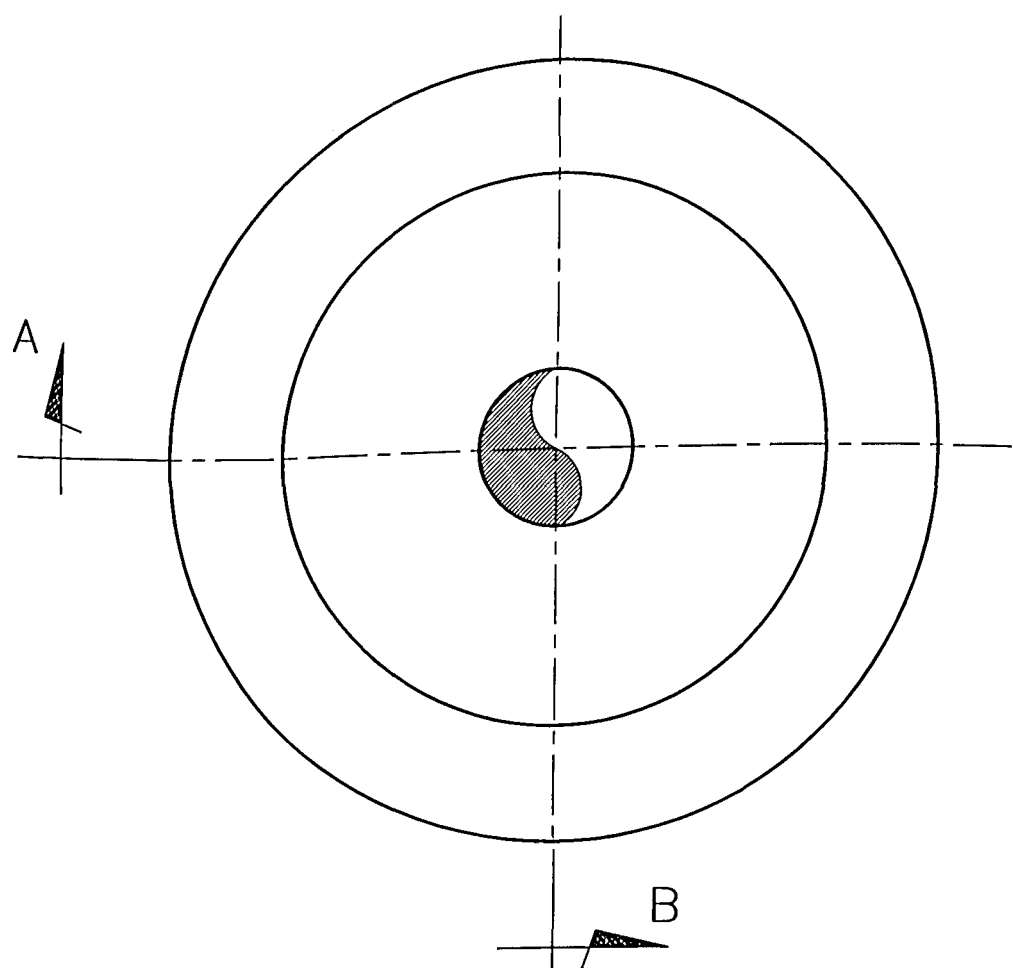


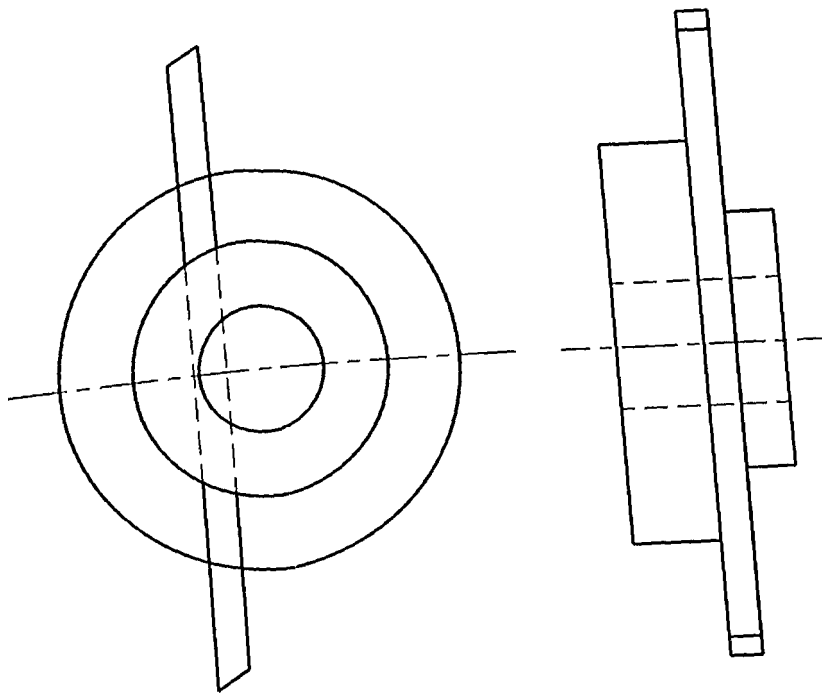
# ANEXO I

CONJUNTO DO FERRAMENTAL Nº 1



CORTE AB





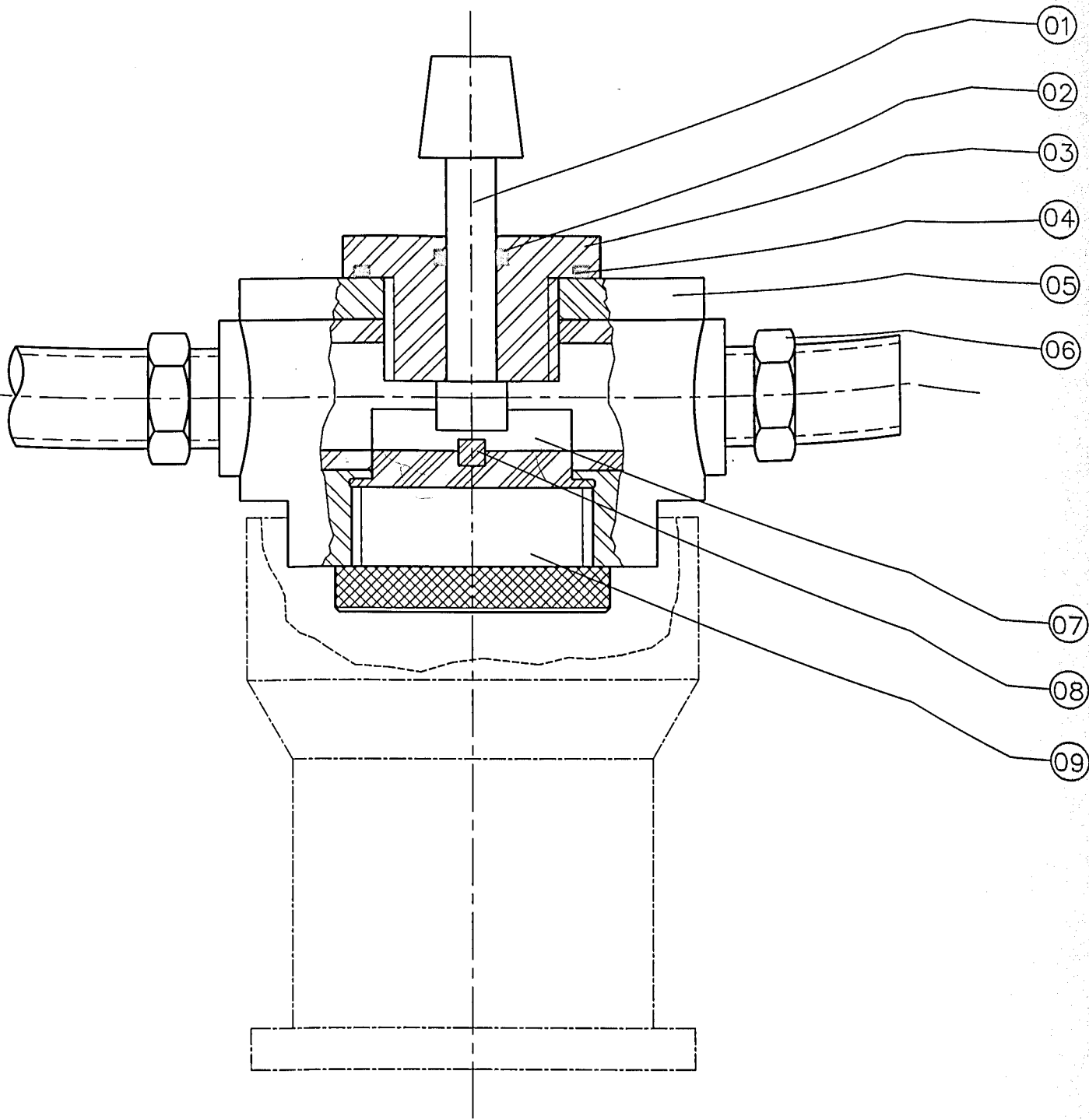
DETALHE DO POSICIONADOR E DA PEÇA

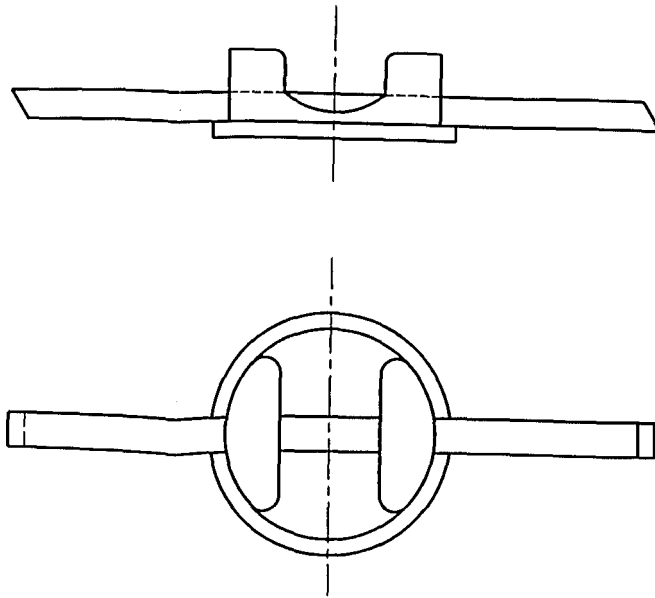
|        |  |          |          |                |        |
|--------|--|----------|----------|----------------|--------|
| 10     | OBTURADOR  |          | 01       | TECNYL         |        |
| 09     | PEÇA - "BIT" $\varnothing$ 6.35x127                  |          | 01       | ABNT M2        |        |
| 08     | BASE   |          | 01       | ALUMÍNIO       |        |
| 07     | POSICIONADOR   |          | 01       | TECNYL         |        |
| 06     | ELETRODO FERRAMENTA                                  |          | 01       | COBRE          |        |
| 05     | O'RING $\varnothing$ 123x3                           |          | 01       | BORRACHA NITR. |        |
| 04     | CÂMARA   |          | 01       | TECNYL         |        |
| 03     | PORCA RANHURADA                                      |          | 01       | COBRE          |        |
| 02     | O'RING $\varnothing$ 28x3                            |          | 01       | BORRACHA NITR. |        |
| 01     | CANHÃO   |          | 01       | COBRE          |        |
|        |  |          | QTD      | MATERIAL       | OB     |
| ITEM   | DENOMINAÇÃO  |          |          |                |        |
| PROJ.  | NOME   | DATA     | RESPONS. |                |        |
| DES.   | JÚLIO  | 04/07/97 |          |                |        |
| ESCALA | TÍTULO<br>FERRAMENTAL PARA USINAGEM<br>ELETROQUÍMICA |          |          |                | NÚMERO |



UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE UBERLÂNDIA  
DEPTO DE ENG. MEC







DETALHE DO INSERTO E DA PEÇA

| 10     |                                     |          | 01       |                            |     |
|--------|-------------------------------------|----------|----------|----------------------------|-----|
| 09     | BUJÃO                               |          | 01       | TECNYL                     |     |
| 08     | PEÇA - "BIT" $\varnothing$ 6.35x127 |          | 01       | ABNT M2                    |     |
| 07     | INSERTO                             |          | 01       | BORRACHA <del>TECNYL</del> |     |
| 06     | ACOPLAMENTO - MANGUEIRA 3/4"        |          | 02       | PVC                        |     |
| 05     | CÂMARA - CONJUNTO                   |          | 01       | ALUMÍNIO/TECN.             |     |
| 04     | O'RING $\varnothing$ 30             |          | 01       | BORRACHA NITR.             |     |
| 03     | GUIA                                |          | 01       | TECNYL                     |     |
| 02     | O'RING $\varnothing$ 12.7           |          | 01       | BORRACHA NÍTR.             |     |
| 01     | ELETRODO FERRAMENTA                 |          | 01       | COBRE                      |     |
| ITEM   | DENOMINAÇÃO                         |          | QTD      | MATERIAL                   | OBS |
| PROJ.  | NOME                                | DATA     | RESPONS. |                            |     |
| DES.   | JÚLIO                               | 04/07/97 |          |                            |     |
| ESCALA | TÍTULO                              |          |          | NÚMERO DESENHO             |     |
|        | FERRAMENTAL PARA USINAGEM           |          |          |                            |     |
|        | ELETROQUÍMICA                       |          |          |                            |     |



UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE UBERLÂNDIA  
DEPTO DE ENG. MECÂNICA

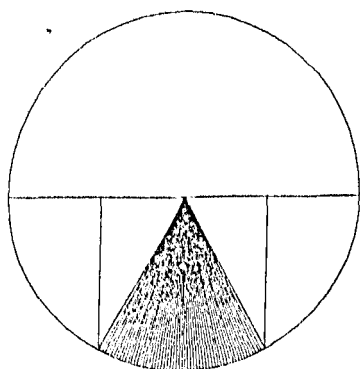
# ANEXO III

**PERFIL DA PONTA FERRAMENTA DE RAIO**

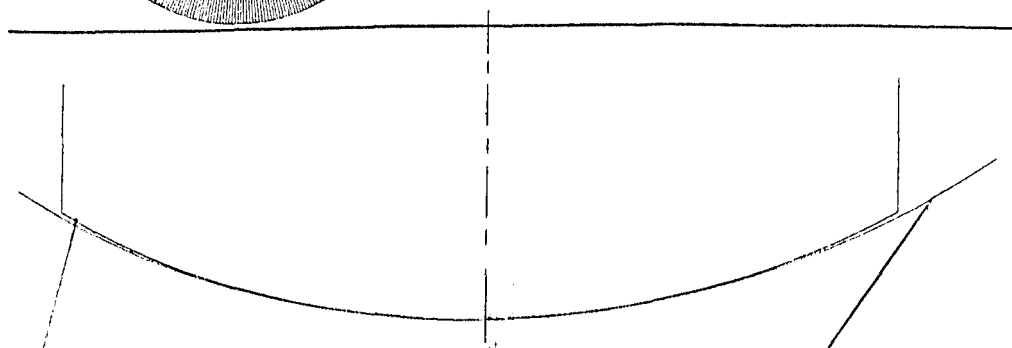
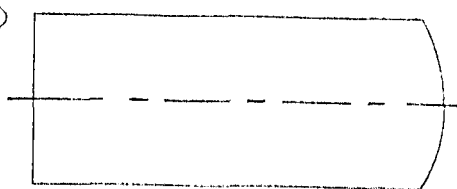
**VARIÁVEL**

# DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DA FERRAMENTA PARA O PROCESSO IDEAL

ESCALA 1:1



(40, 40)



curva  $R = 25 - 0,9 \sec \alpha$   $\{-28,35 < \alpha > 28,35\}$

circunferência  $\Phi = 24,1$  mm.

“discretizada” em 56 pontos, com incremento de  $1^\circ$

ESCALA 5:1