



JOÃO PAULO DE OLIVEIRA

# **Contribuições ao Aprimoramento do Processo de Abertura de Cavidades Quadradas com Ferramentas Rotativas**

98/2014

CAMPINAS

2014



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO PAULO DE OLIVEIRA

# **Contribuições ao Aprimoramento do Processo de Abertura de Cavidades Quadradas com Ferramentas Rotativas**

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO JOÃO PAULO DE OLIVEIRA, E ORIENTADA  
PELO PROF. DR. AMAURI HASSUI.

A handwritten signature in black ink, which appears to read "Amauri Hassui", is written over a horizontal dotted line. Below the line, the text "ASSINATURA DO ORIENTADOR" is printed in a black, sans-serif font.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS  
2014**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

OL4c Oliveira, João Paulo de, 1985-  
Contribuições ao aprimoramento do processo de abertura de cavidades quadradas com ferramentas rotativas / João Paulo de Oliveira. – Campinas, SP: [s.n.], 2014.

Orientador: Amauri Hassui.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Usinagem. 2. Máquinas - Ferramenta - Controle numérico. 3. Processos de fabricação. I. Hassui, Amauri, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Contributions to the improvement of the square cavity opening process with rotary tools

**Palavras-chave em inglês:**

Machining

Machinery - Tools - Numerical Control

Manufacturing Process

**Área de concentração:** Materiais e Processos de Fabricação

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Amauri Hassui [Orientador]

Olivio Novaski

Carlos Elias da Silva Junior

**Data de defesa:** 29-08-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

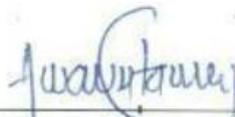
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE FABRICAÇÃO  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

# Contribuições ao Aprimoramento do Processo de Abertura de Cavidades Quadradas com Ferramentas Rotativas

Autor: João Paulo de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovaram essa Dissertação:



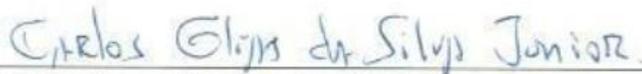
---

Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente  
Instituição UNICAMP Campinas



---

Prof. Dr. Olívio Novaski  
Instituição UNICAMP Campinas



---

Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior  
Instituição UTF-PR Cornélio Procópio

Campinas, 29 de agosto de 2014.

Dedico este trabalho,  
especialmente aos meus pais.  
E também à minha esposa,  
que sempre está ao meu  
lado nos bons e maus momentos.

## Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais, pela ajuda e incentivo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Amauri Hassui, que me deu a oportunidade de concluir mais este projeto.

Ao SENAI de Piracicaba, por meio do Prof. Marcelo Hirai, que me ajudou muito na realização dos experimentos.

À empresa Usinagem Veneza, em nome do Sr. Dorvair Gonçalves, que sempre me ajudou quando precisei.

Ao SENAI de Sumaré, através do Coordenador Rogério.

Aos amigos João Paulo e Jeferson de Limeira.

À minha querida esposa, amiga e companheira, Amanda.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

*Marthin Luther King*

*“Deus não vai nos livrar das lutas, mas vai nos ajudar a alcançar resultados”.*

*Pe. Fábio de Melo*

## Resumo

Para as indústrias aumentarem a produtividade, se faz necessário buscar melhorias contínuas e muitas vezes radicais em seus processos de fabricação. Uma das maneiras de obter êxito e melhorar os processos existentes é investir em inovação. Diante deste cenário, o presente trabalho visa contribuir para evolução do processo de obtenção do furo quadrado em máquina CNC. O processo para obtenção de furo quadrado em máquina CNC é recente, porém limitado, atualmente é possível produzir furos quadrados com cantos arredondados e apenas com ferramenta de medida igual à medida do furo que se quer produzir. Os testes feitos com uma nova modelagem matemática, mostraram ser possível obter mais pontos de programação e consequentemente obter uma melhor geometria do furo, com cantos afiados, e também aumentar a flexibilidade do processo, já que com uma ferramenta é possível fazer vários furos de medidas distintas à medida da ferramenta. Através dos experimentos, também foi possível mostrar uma aplicação prática do processo, tornando-o ainda mais vantajoso e produtivo.

*Palavras Chave:* Usinagem, Furo quadrado, CNC, Processo de Fabricação.

## **Abstract**

For industries to increase productivity it is necessary to keep seeking for improvements and often radical improvements in their manufacturing processes. One of the ways to succeed and improve the existing processes it is to invest in innovation. In this scenario, the present work aims to contribute to the evolution of obtaining the square hole in CNC machine process. The process for obtaining the square hole CNC machine new, but limited. Currently it is possible to produce square holes with rounded corners and with only the same extent as the hole tool which it is willing to produce. The tests made with a new mathematical modeling showed that it is possible to obtain more points programming therefore get a better geometry of the hole with sharp corners also increase the flexibility of the process, as with a tool it is possible to make several holes measures as distinct from the tool. Through the experiments it was also possible to show a practical application of the process, making it even more beneficial and productive.

*Key words:* Machining, Square Hole, CNC, Manufacturing Process.

## Lista de Ilustrações

2.1	Broca para furo quadrado	4
2.2	Prato guia para obtenção do polígono	4
2.3	Broca de 5 cortes para obtenção de furo sextavado	4
2.4	Dispositivo para furos Poligonais	5
2.5	Dispositivo para furos Poligonais no Torno Mecânico	5
2.6	Dispositivo para obtenção de furo quadrado sem utilização de máscara guia	6
2.7	Ferramenta baseada no triângulo de Releaux	7
2.8	Imagem do Furo quadrado no Projetor de Perfil	7
2.9	Movimento de Corte	9
2.10	Movimento de Avanço	9
2.11	Movimento de Profundidade	10
2.12	Movimento de Furação da Broca	10
2.13	Broca Helicoidal	11
2.14	Broca de ajuste radial com pastilhas intercambiáveis	12
2.15	Tipos de Fresamento	14
2.16	Perfis variados de Fresamento	15
2.17	Operação de Brochamento	16
2.18	Ferramenta Brocha	16
2.19	Brochamento externo	18
2.20	Brochamento interno	19
2.21	Processo de brochamento	19
2.22	Processo de Eletroerosão simplificado	21
2.23	Obtenção da cavidade no material	22
2.24	Cavidade no material	22
2.25	Usinagem de um quadrado	23
2.26	Usinagem de um Hexágono	24
2.27	Usinagem de um Polígono não-regular	24
2.28	Peça produzida por Eletroerosão à fio	25
2.29	Configuração de uma máquina de Eletroerosão	26

2.30	Limpeza por Injeção	27
2.31	Limpeza por Pressão	28
2.32	Impacto ambiental resultante de descargas elétricas de matriz profunda	29
2.33	Peça produzida por Jato de água	30
2.34	Mistura da água com abrasivo	31
2.35	Sistema de formação do LASER	35
2.36	Máquina de corte a LASER	36
3.1	Triângulo de Reuleaux	41
3.2	Baricentro do Triângulo de Reuleaux	42
3.3	Triângulo de Reuleaux girando dentro do quadrado	43
4.1	Etapas de construção da ferramenta	47
4.2	Ferramenta utilizada na usinagem do furo quadrado	48
4.3	Sincronia de movimentos na máquina ferramenta CNC	48
4.4	Centro de Usinagem ROMI - Discovery 760	49
4.5	Posicionamento inicial da ferramenta	51
5.1	Furo quadrado de 13 mm	55
5.2	Furo quadrado de 17 mm	55
5.3	Furo quadrado de 22 mm	55
5.4	Furo quadrado de 24 mm	56
5.5	Esquema de medição para os furos	56
5.6	Obtenção de canto afiado no quadrado	57
5.7	Furos fora das dimensões desejadas	59

## Lista de Tabelas

2.1	Influência das Variáveis no processo de corte por jato de água	33
2.2	Tipos de Materiais e suas aplicações no corte a LASER	39
2.3	Vantagens e Desvantagens no processo de corte a LASER	40
4.1	Condições do experimento no Centro de Usinagem	50
4.2	Medida do Quadrado e medida da Ferramenta utilizada nos experimentos	52
4.3	Condições para a realização dos experimentos	53
5.1	Valores obtidos nos ensaios dos furos quadrados	57
5.2	Valores obtidos nas medições dos furos	59

## Lista de Abreviaturas e Siglas

**CAD** – Computer Aided Design

**CAM** – Computer Aided Manufacturing

**CN** – Comando Numérico

**CNC** – Comando Numérico Computadorizado

**CO<sup>2</sup>** - Dióxido de carbono

**Desl.** – Deslocamento

**EDM** - Electrical Discharge Machining

**EUA** – Estados Unidos da América

**GAP** – Folga (Tamanho da centelha)

**He** - Hélio

**HSM** - High Speed Machine

**L** - Lado do quadrado

**LASER** - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

**Ma** - Movimento de avanço

**Mc** – Movimento de Corte

**mm** – Milímetro

**m/min** – Metros por minuto

**Mp** - Movimento de profundidade

**Mt** - Momento de torção

**N** - Nitrogênio

**Pa** - Força de avanço

**PP** – Polipropileno

**PSI** – Pound per Square Inch

**RPM** – Rotação por Minuto

**US** – United States

**WJC** - Water Jet Cutting

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Breve Histórico do Furo Quadrado	3
2.2 Processos de Usinagem	8
2.2.1 Usinagem e seus movimentos	8
2.3 Furação	10
2.3.1 Brocas	12
2.4 Fresamento	13
2.4.1 Tipos e operações de Fresamento	14
2.5 Brochamento	16
2.5.1 Brochadeiras	17
2.5.2 Tipos de Brochamento	18
2.6 Eletroerosão	20
2.6.1 Eletroerosão por penetração	21
2.6.2 Aplicação prática de EDM por penetração	24
2.6.3 Eletroerosão à fio	26
2.6.4 Equipamento	27
2.6.5 A limpeza no Processo	29
2.6.6 Desvantagem	30
2.7 Corte com Jato de água	31
2.7.1 História	31
2.7.2 Funcionamento	32
2.7.3 Equipamentos	34
2.7.4 Variáveis de corte	35
2.7.5 Analisando os Prós e contras	35
2.8 Corte a LASER	36
2.8.1 Forma de geração do LASER	37

2.8.2 Máquinas de corte a LASER	38
2.8.3 Fatores importantes	39
2.8.4 Indicações de Uso	40
2.8.5 Vantagens e Desvantagens	42
3 METODOLOGIA	43
3.1 Modelo Matemático	43
4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	49
4.1 Ferramenta	49
4.2 A Máquina	50
4.3 Material	52
4.4 Posição Inicial da Ferramenta	52
4.5 Os experimentos	53
4.5.1 Primeira Etapa	54
4.5.2 Segunda Etapa	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 Geometria obtida	56
5.2 Problema de Aplicação	60
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	63
6.1 Geometria	63
6.2 Modelagem Matemática	63
6.3 Aplicação	63
6.4 Sugestões para Trabalhos Futuros	64
REFERÊNCIAS	65
ANEXO A	68

# 1 INTRODUÇÃO

Existe constantemente uma procura incessante por meios de produção cada vez mais flexíveis e ágeis, para a indústria mecânica e outras. A principal força condutora da mudança é a inovação. As indústrias de manufatura devem estar preparadas para o avanço tecnológico e a mudança em processos de fabricação convencionais. As constantes mudanças acerca do ambiente produtivo, e a busca por meios e processos mais vantajosos, fazem com que conceitos primitivos ainda muito utilizados, tenham que ser constantemente analisados e aprimorados.

O presente trabalho vai tratar especialmente de um processo de usinagem que há muito tempo é objeto de estudo de engenheiros e estudiosos. A escolha deste assunto visa principalmente aumentar o conhecimento, o desenvolvimento e as maneiras de melhorá-lo através do seu aprimoramento.

A obtenção do furo quadrado em máquinas ferramentas CNC com sincronia de movimento entre ferramenta e peça, já foi consolidado, a partir daí, o objetivo do presente trabalho, é apresentar a mesma forma de obter o polígono em questão, mas de forma a ter o controle do processo, tornando-o mais ágil e flexível. Consequentemente com período de setups das máquinas diminuída por conta do novo processo, a produtividade aumenta.

A metodologia adotada para validar os experimentos apresentado neste trabalho, baseia-se principalmente no uso da máquina CNC, capaz de realizar tal operação, da ferramenta com geometria especial e principalmente do modelo matemático capaz de traçar os pontos de coordenadas para a programação na máquina, uma vez que os sistemas CAM existentes não o fazem.

A principal aplicação do presente trabalho, é mostrar alternativas para a produção do furo quadrado, eliminando assim a necessidade de utilizar processos de fabricação convencionais, com alto custo de produção, buscando a partir daí, baratear o processo, e torná-lo ainda mais vantajoso para indústria manufatureira.

Desta forma, espera-se que este trabalho venha contribuir positivamente com o desenvolvimento da indústria mecânica, tanto na inovação como na agilidade e flexibilidade de máquinas, ferramentas e softwares já existentes.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentado a evolução e desenvolvimento do processo para obtenção do furo quadrado, desde a invenção de dispositivos mecânicos até alguns trabalhos de pesquisa realizados sobre o assunto, e processos de fabricação convencionais e não convencionais para usinagem do polígono.

### 2.1 Breve Histórico do Furo Quadrado

Fazer furo com uma secção transversal não circular nunca foi uma tarefa fácil, é um problema de várias gerações de muito interesse na área da engenharia. Os estudos de usinagem que tem por objetivo principal a obtenção de furos poligonais, tiveram seu início no final do século XIX com o registro de uma patente de David Brown Hutton e Archibald Frederick George Daniels intitulados de “*Drill for drilling square holes*”, sob o N° US456258, que demonstrava ser possível obter furos quadrados através de um dispositivo com uma máscara guia e uma ferramenta de três arestas de corte, que foi melhorado já no século XX com o registro de outra patente, sob N° 1250450, “*Drilling appliance*”, de Richard Henry Harris, mais precisamente no ano de 1916, que apresentava uma evolução no processo, sendo possível obter furos quadrados e hexagonais.

Contudo, podemos começar a rastrear os estudos acerca deste importante assunto a partir do ano de 1917, quando James Watts patenteou um dispositivo que precisava de uma placa guia para fazer um furo quase quadrado, sob N° 1,241,175, com o seguinte título, “*Floating Tool Chuck*”.

No mesmo ano, James Watts patenteou mais dois inventos, referentes ao mesmo assunto. Sua ideia foi tão bem sucedida que fundaram a empresa Irmãos Watts que funciona em Wilmerding, Pensilvânia, EUA. E hoje estas ferramentas podem ser compradas, inclusive pela internet.

Algumas destas ferramentas podem ser vistas a seguir, figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5.



Figura. 2.1 – Broca para furo quadrado  
Disponível em: <http://www.drill-service.co.uk/Tools.asp?Tool=02072000000>  
Acesso em: 13/12/2013



Figura. 2.2 Prato guia para obtenção do polígono  
Disponível em: <http://www.drill-service.co.uk/Tools.asp?Tool=02072000000>  
Acesso em: 13/12/2013



Figura. 2.3 Broca de 5 cortes para obtenção de furo sextavado  
Disponível em: <http://www.drill-service.co.uk/Tools.asp?Tool=02072000000>  
Acesso em: 13/12/2013



Figura. 2.4 Dispositivo para furos Poligonais  
Disponível em: <http://www.drill-service.co.uk/Tools.asp?Tool=020720000000>  
Acesso em: 13/12/2013



Figura. 2.5 Dispositivo para furos Poligonais no Torno Mecânico  
Disponível em: <http://www.mikesenese.com/DOIT/2011/10/drilling-square-holes-with-a-reuleaux-triangle>  
Acesso em: 13/12/2013

Posteriormente ao longo dos anos, outros inventores também patentearam projetos muito parecidos, com algumas melhorias em relação ao de J. Watts. Dentre estes inventores, podemos destacar Charles Wolkerstorfer em 1926, Rudolf Bartholomäus em 1930 e Paul Harraser em 1931. Todas as patentes desenvolvidas e registradas até o momento por seus inventores, se tratavam de dispositivos mecânicos.

Até que em 2002 os pesquisadores Takahiro Funaki e Tomoo Hayashi, apresentaram uma patente de um dispositivo controlado por um Comando Numérico, bem próximo ao trabalho aqui proposto, e em seguida outros quatro inventores Kouichi Katoh, Takamasa Ito, Nobuyuki Endo e Makoto Sagara, patentearam a ferramenta utilizada no trabalho de Takahiro Funaki e Tomoo Hayashi.

No mesmo ano, um matemático brasileiro desenvolveu um dispositivo, capaz de fazer o furo quadrado sem a necessidade de utilizar a placa guia.

No dispositivo desenvolvido pelo inventor Antônio César da Costa Barros para obter furos quadrados, a ferramenta percorre uma trajetória elíptica, deduzida matematicamente pelo próprio inventor que além do movimento de rotação do eixo da máquina, também realiza um movimento de translação em torno do eixo da ferramenta, que permite que o furo saia quadrado.

Segue abaixo figura 2.6, do dispositivo que tem uma caixa de engrenagens que reproduz os movimentos de forma sincronizada.



Figura. 2.6 - Dispositivo para obtenção de furo quadrado sem utilização de máscara guia. (BARROS, 2002)

O registro mais próximo ao trabalho que está sendo proposto, principalmente por utilizar-se de máquina - ferramenta CNC, é o trabalho desenvolvido e apresentado como defesa de dissertação de mestrado do Engº Marcelo Hirai Castro. No seu trabalho, o autor busca mostrar a flexibilidade que o controlador numérico tem de executar movimentos sincronizados entre peça e ferramenta, e relacionar com modelos matemáticos que propiciam a possibilidade de obter coordenadas para serem programadas na máquina.

Para Castro (2012), devido o movimento de rotação da ferramenta ter que ser sincronizado, condição essa, que não existe na mecânica de usinagem nos mais diversos processos, se faz necessário a confecção de uma ferramenta de corte especial baseada no trabalho de BARROS. A figura 2.7 abaixo mostra a ferramenta utilizada.

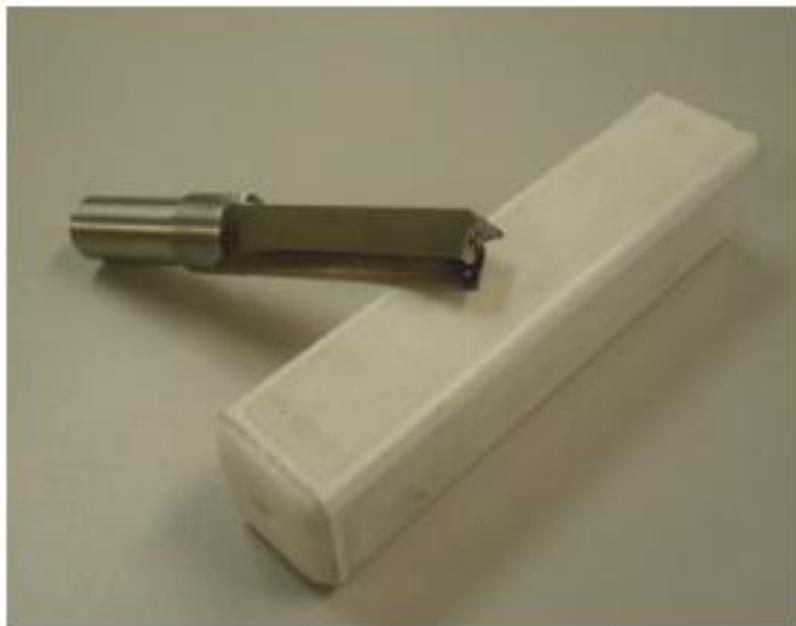


Figura. 2.7 – Ferramenta baseada no triângulo de Releaux. (CASTRO, 2012)

Segundo o trabalho de CASTRO, foi possível obter o furo quadrado, mas com os cantos arredondados. Figura 2.8.



Figura. 2.8 – Imagem do Furo quadrado no Projetor de Perfil. (CASTRO, 2012)

Pode-se afirmar então, que com a trajetória da ferramenta programada em máquina CNC, é possível obter furos poligonais com a tecnologia existente nas máquinas atuais.

## **2.2 Processos de Usinagem**

Além do processo desenvolvido e apresentado anteriormente para obtenção de furos quadrados, a seguir serão listados vários processos de usinagem convencionais e não convencionais, que também possibilitam a usinagem do furo quadrado.

### **2.2.1 Usinagem e seus movimentos**

A usinagem é o processo de fabricação que consiste em remover o sobremetal de uma peça ou bloco de material sólido para a obtenção de um ou vários produtos. Assim, removendo o

sobremetal, a peça adquire a forma, as dimensões e o acabamento que estão especificados no desenho de execução ou desenho da peça. (Processos de Usinagem SENAI-SP, 2003).

Os movimentos de usinagem permitem a retirada do sobremetal e a transformação da matéria bruta em peça. Os movimentos são executados por máquinas operatrizes, que devem responder às exigências de forma, de exatidão dimensional e de acabamento superficial pré - estabelecidas para a peça a ser trabalhada. (Processos de Usinagem SENAI-SP, 2003).

Nas máquinas operatrizes responsáveis pela usinagem de peças de formatos variados e aplicações nos mais diversos segmentos, há três movimentos principais de usinagem, que são: movimento de corte, movimento de avanço e movimento de profundidade.

**Movimento de corte** – O movimento de corte, como mostra a figura 2.9, consiste no giro ou curso dado no material bruto ou na ferramenta para remover o sobremetal localizado neste percurso. Nos manuais, catálogos e demais documentos, o movimento de corte é indicado pelas letras **mc**. O movimento de corte gera o comprimento do cavaco. (Processos de Usinagem SENAI-SP, 2003).

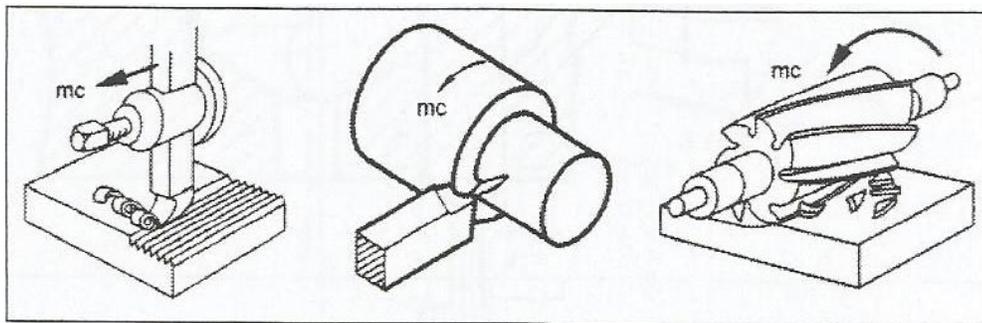


Figura. 2.9 - Movimento de Corte. (SENAI-SP, 2003)

**Movimento de avanço** – Já o movimento de avanço, como mostra a figura 2.10, possibilita a retirada do sobremetal nas voltas ou cursos seguintes, dando origem à espessura do cavaco. O movimento de avanço é indicado nos manuais, catálogos e demais documentos pelas letras **ma**. (Processos de Usinagem SENAI-SP, 2003).

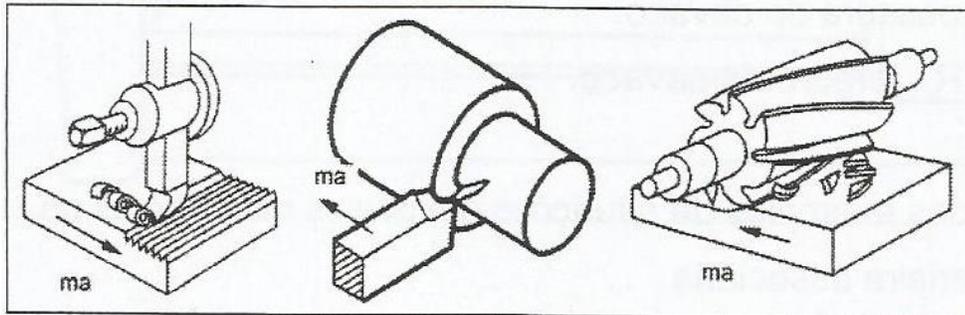


Figura. 2.10 - Movimento de Avanço. (SENAI-SP, 2003)

**Movimento de profundidade** – O movimento de profundidade, como mostra a figura 2.11, por sua vez, permite a regulagem do corte, gerando a largura do cavaco. Nos manuais, catálogos e demais documentos, o movimento de profundidade é indicado pelas letras **mp**. (Processos de Usinagem SENAI-SP, 2003).

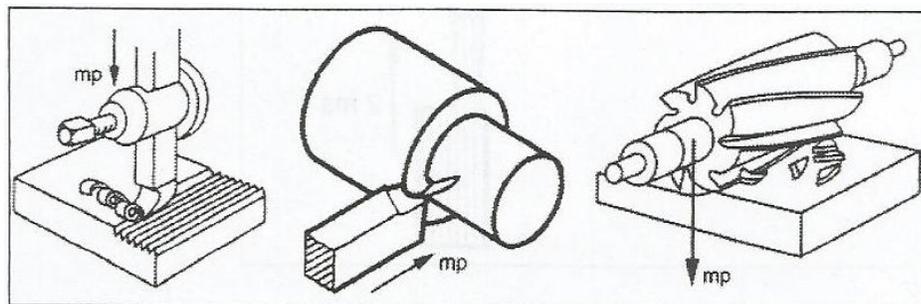


Figura. 2.11 - Movimento de Profundidade. (SENAI-SP, 2003)

## 2.3 Furação

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria tem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc.). (Diniz; Marcondes; Coppini, 2010, p.193).

Este processo, figura 2.12, muito utilizado na indústria, é a primeira etapa do processo para a obtenção do furo quadrado, objeto de estudo deste trabalho.

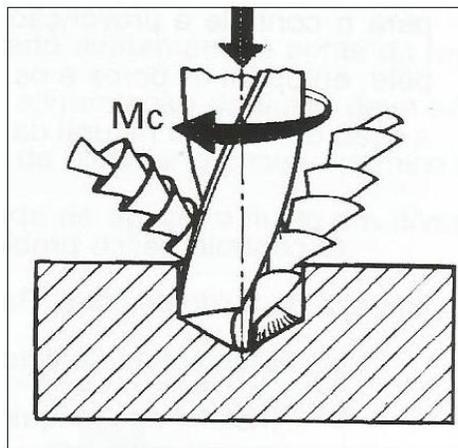


Figura. 2.12 – Movimento de Furação da Broca. (SENAI-SP, 2003)

No decorrer dos últimos 150 anos, o desenvolvimento das máquinas-ferramentas e das ferramentas de usinagem foi considerável. Com raras exceções, foram conseguidos progressos apreciáveis na tecnologia das ferramentas e estes progressos estimularam o desenvolvimento das máquinas-ferramentas. (Ferraresi, 1973, p.1).

Nos últimos anos, no entanto, tem crescido a utilização de centros de usinagem no processo de furação. Não é raro se encontrar máquinas deste tipo propiciando rotações do eixo-árvore superiores a 6000 rpm (e, às vezes, bem superiores). (Diniz; Marcondes; Coppini, 2010, p.193).

Contudo, houve também uma grande evolução acerca dos materiais das brocas, como por exemplo, broca de aço rápido com revestimento duro, broca inteiriça de metal duro, brocas intercambiáveis de metal duro e as brocas especiais, porém muitas das operações de furação são realizadas com brocas helicoidais de aço rápido. (Diniz; Marcondes; Coppini, 2010).

### 2.3.1 Brocas

As brocas do tipo helicoidal de aço rápido são as mais utilizadas na mecânica, por isso, é necessário conhecer suas características de construção e nomenclatura.

Basicamente a broca é dividida em três partes: haste, corpo e ponta.

**Haste:** é a parte que fica presa à máquina, pode ser cônica ou cilíndrica.

**Corpo:** é a parte que serve de guia e corresponde ao comprimento útil da ferramenta.

**Ponta:** é a extremidade cortante que recebe a afiação.

A seguir, a figura 2.13 ilustra as três partes básicas de uma broca.

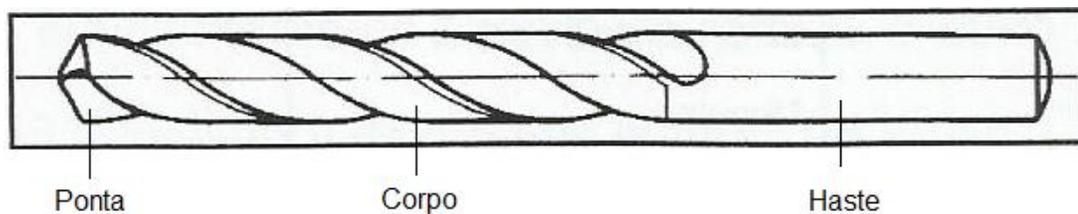


Figura. 2.13 – Broca Helicoidal. (SENAI-SP, 2003)

**Características da brocas** – As brocas são caracterizadas pelas dimensões, pelo material no qual é fabricada e pelos seguintes ângulos: ângulo de hélice, ângulo lateral de folga e ângulo de ponta.

**Brocas especiais** – Além da broca helicoidal existem outros tipos de brocas para usinagens especiais. Entre elas podemos destacar por exemplo: broca de centrar, broca escalonada, broca canhão, broca com furo para fluido de corte, broca com pastilha de metal duro, broca para furação curta, broca trepanadora e a broca de ajuste radial com pastilhas intercambiáveis, capaz de produzir furos com estreita tolerância e grandes diâmetros, figura 2.14.



Figura. 2.14 – Broca de ajuste radial com pastilhas intercambiáveis. (SANDVIK, 2013)

## 2.4 Fresamento

O fresamento é utilizado para se obter superfícies com formatos:

- Planos, paralelos ao eixo de rotação da ferramenta;
- Planos, perpendiculares ao eixo de rotação da ferramenta.

O fresamento também é empregado para se obterem formas combinadas desses dois tipos com ferramenta multicortante empregada para realizar o fresamento. A fresa realiza o movimento de corte; a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca, realizando o movimento de avanço. (Processos de Usinagem SENAI-SP, 2003, p.149).

De acordo com Diniz (2010), o fato de a fresa poder se apresentar sob as mais variadas formas confere a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas. Boa parte das superfícies não planas e não de revolução de peças mecânicas somente podem ser geradas por fresamento. Assim o fresamento pode competir com a furacão, com o alargamento, e o aplainamento. (Diniz; Marcondes; Coppini., 2010, p.213).

Além de todas as aplicações convencionais, o fresamento é uma forte alternativa para fazer furos, roscas, cavidades e superfícies que costumavam ser torneadas, furadas ou rosqueadas com macho. (SANDVIK, 2013).

A máquina é muito importante para a escolha do método de fresamento. Faceamento/fresamento de cantos a 90 graus, ou canais podem ser realizados em máquinas de 3 eixos, enquanto o fresamento de perfis 3D requer máquinas de 4 ou 5 eixos. (SANDVIK, 2013).

Os atuais centros de torneamento oferecem capacidades de fresamento devido às ferramentas acionadas e os centros de usinagem geralmente possuem capacidade para torneamento. Os desenvolvimentos CAM significam que máquinas de 5 eixos são cada vez mais comuns. Eles oferecem aumento da flexibilidade, mas a estabilidade pode ser uma limitação. (SANDVIK, 2013).

#### **2.4.1 Tipos e operações de Fresamento**

Segundo Ferraresi (1973), de acordo com a disposição dos dentes ativos da fresa, existem dois tipos fundamentais de fresamento, elas podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Fresamento tangencial – os dentes ativos de corte estão na superfície cilíndrica da ferramenta, neste caso o eixo da fresa é paralelo à superfície gerada.
  
- Fresamento frontal – os dentes ativos de corte estão na superfície frontal da ferramenta, neste caso o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada.

A seguir, a figura 2.15 apresenta os dois tipos fundamentais de fresamento.

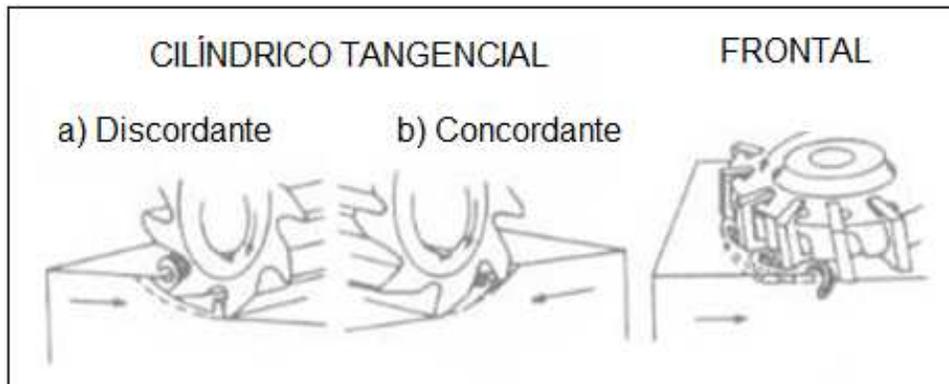


Figura. 2.15 – Tipos de Fresamento. (FERRARESI, 1973)

Além desses dois tipos de classificações básicas de fresamento, existem diversas formas de fresar peças, com perfis variados de geometria, como mostrado na figura 2.16.

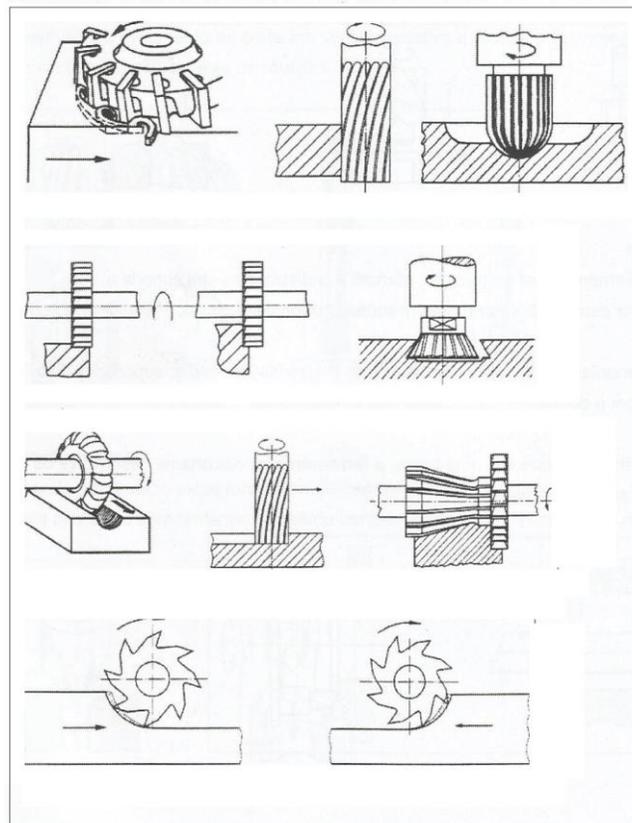


Figura. 2.16 – Perfis variados de Fresamento. (FERRARESI, 1973)

## 2.5 Brochamento

No brochamento, uma ferramenta com uma série de dentes chamada brocha é empurrada ou puxada sobre uma superfície na peça em usinagem como na figura 2.17. Cada dente tira um cavaco fino da superfície.

O brochamento de superfícies internas é chamado brochamento interno ou brochamento de furo; de superfícies externas, é chamado, brochamento externo ou brochamento superficial. (Doyle, 1962, p.494).

Segundo Stemmer (1992), o brochamento é um processo de usinagem, onde o movimento de corte é linear, assim como no plainamento, caracterizando-se, pela utilização de uma ferramenta de dentes múltiplos.

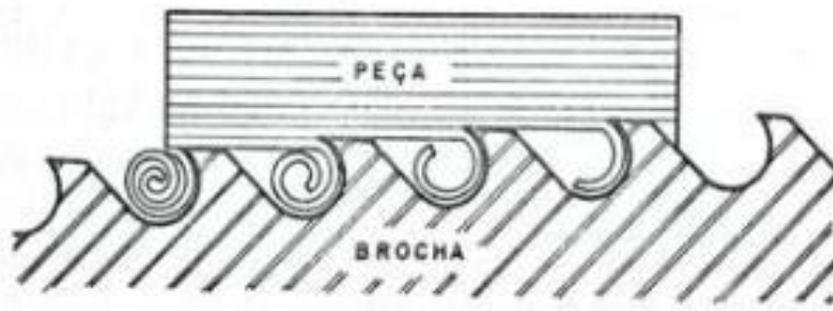


Figura. 2.17 – Operação de Brochamento. (DOYLE, 1962)

A brocha, ferramenta utilizada no brochamento, fabricadas em aço rápido são temperadas e revenidas pois os dentes de sua superfície cortante são submetidos a grande esforço mecânico, geralmente é projetada para fazer um trabalho específico para certas necessidades. Uma forma típica é apresentada na figura 2.18.

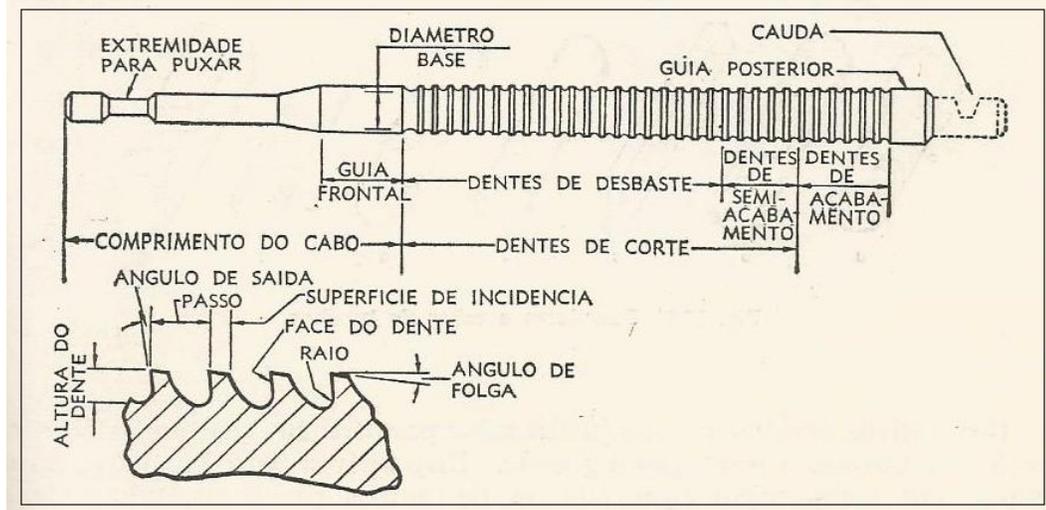


Figura. 2.18 – Ferramenta Brocha. (DOYLE, 1962)

## 2.5.1 Brochadeiras

A brochadeira é a máquina utilizada para fazer o processo de brochamento com movimento retilíneo. Ela pode ser vertical ou horizontal e seu comando pode ser mecânico ou hidráulico.

Segundo Doyle (1962), as brochadeiras podem ser classificadas em:

- Brochadeiras de compressão
- Brochadeiras de tração
- Brochadeiras externas
- Brochadeiras contínuas

O processo de brochamento em brochadeiras do tipo compressão é feito em prensas manuais ou com pistão hidráulico. Neste tipo de brochadeira o torpedo que empurra a ferramenta sobre a peça a ser usinada fica na posição vertical.

Numa brochadeira do tipo tração, as brochas são usadas principalmente para brochamento interno, mas em alguns casos fazem brochamento externo. Neste processo a peça é brochada no sentido horizontal ou vertical. (Laureano, et al, 2009).

Na brochadeira externa, a ferramenta pode se mover tanto horizontalmente como verticalmente e usinam peças pesadas e volumosas e tem cursos longos.

Uma brochadeira contínua é diferente das outras brochadeiras descritas anteriormente, pois a brocha permanece parada, enquanto as peças em usinagem são arrastadas, passando sob a ferramenta.

## 2.5.2 Tipos de Brochamento

Na brochadeira podem ser realizados dois tipos de brochamento: o externo e o interno.

### - Brochamento externo

É uma operação feita sobre a superfície externa de uma peça, dando acabamento ou semi-acabamento a seus perfis. A seguir na figura 2.19.

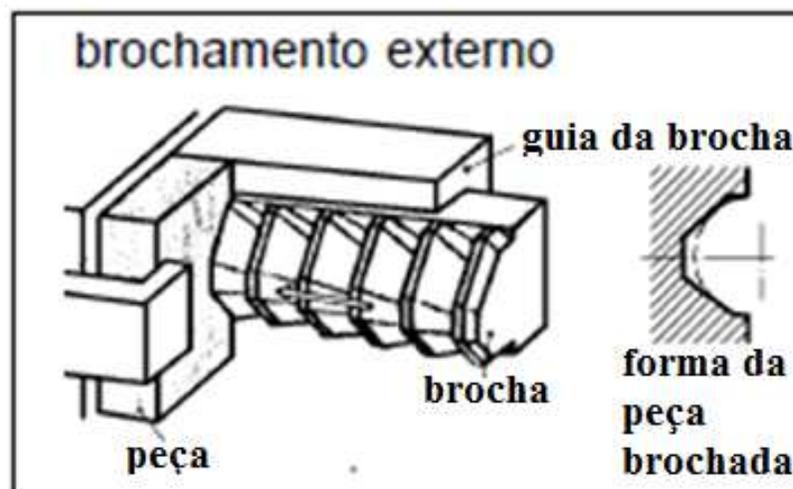


Figura. 2.19 – Brochamento externo. (LAUREANO, et al, 2009)

## - Brochamento interno

É uma operação que permite modificar um furo vazado e transformar o perfil de uma peça. O objetivo dessa operação pode ser o de abrir cavidades para chavetas em furos cilíndricos ou o de transformar perfis de furos cilíndricos em perfis acanelados, estriados, quadrados, hexagonais etc. Essa operação é feita num furo aberto anteriormente por um outro processo qualquer. Figura 2.20.

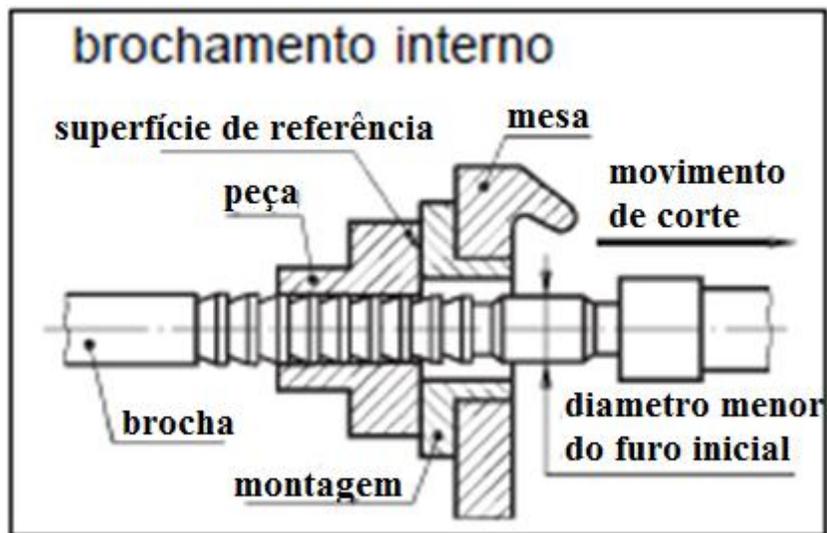


Figura. 2.20 – Brochamento interno. (LAUREANO, et al, 2009)

No processo de brochamento, a transformação de um perfil é feita gradativamente porque os elementos de corte da brocha têm tamanhos que aumentam gradativamente ao longo de seu comprimento. A figura 2.21 a seguir apresenta a forma como o cavaco é arrancado em linha reta e progressivamente pela sucessão ordenada das arestas de corte. (Laureano, et al, 2009).

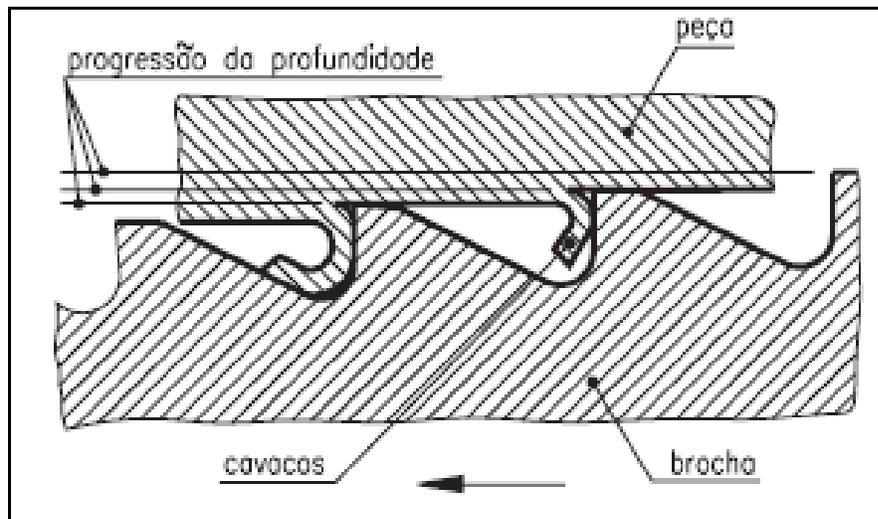


Figura. 2.21 – Processo de brochamento. (LAUREANO, et al, 2009)

## 2.6 Eletroerosão

Os processos de eletroerosão consistem em um método excepcionalmente bom para produzir furos, rasgos e cavidades de geometria complexa em materiais condutores de eletricidade. De uma forma simplificada, pode-se dizer que a eletroerosão baseia-se na remoção de partículas fundidas por arco elétrico e solidificadas por resfriamento. (Ferraresi, 1973).

A grande vantagem da eletroerosão é a capacidade de se obter quaisquer formatos em qualquer material que seja condutor elétrico, porém uma das desvantagens é a sua morosidade se comparada com outros processos de usinagem, dependendo do material a ser usinado. (Doyle, 1962).

A Eletroerosão ou EDM (Electrical Discharge Machining), como também é chamada, pode ser classificada em duas partes:

- eletroerosão por penetração;
- eletroerosão à fio.

O processo mais comum de eletroerosão baseia-se na penetração do eletrodo na peça. Para certas finalidades, como a usinagem de cavidades passantes e perfurações transversais, é preferível usar o processo de eletroerosão a fio.

### **2.6.1 Eletroerosão por penetração**

No processo de eletroerosão por penetração, a ferramenta que produz a erosão, ou seja, a remoção do material da superfície usinada, é o eletrodo. Peça e eletrodo são mergulhados num recipiente que contém um fluido isolante, isto é, não condutor de eletricidade, chamado dielétrico. (Laureano, et al, 2009).

Em geral, são utilizados como dielétricos o óleo mineral e o querosene, porém o querosene requer cuidados especiais, pois é inflamável e exala um odor forte que nocivo à saúde, tanto a peça como o eletrodo estão ligados a uma fonte de corrente contínua, por meio de cabos. Um dos cabos está conectado a um interruptor, ao ser ligado o interruptor, forma-se uma tensão elétrica entre o eletrodo e a peça. De início, não há passagem de corrente, já que o dielétrico atua como isolante. A figura 2.22 a seguir, mostra um esquema simplificado do processo de eletroerosão. (Laureano, et al, 2009)

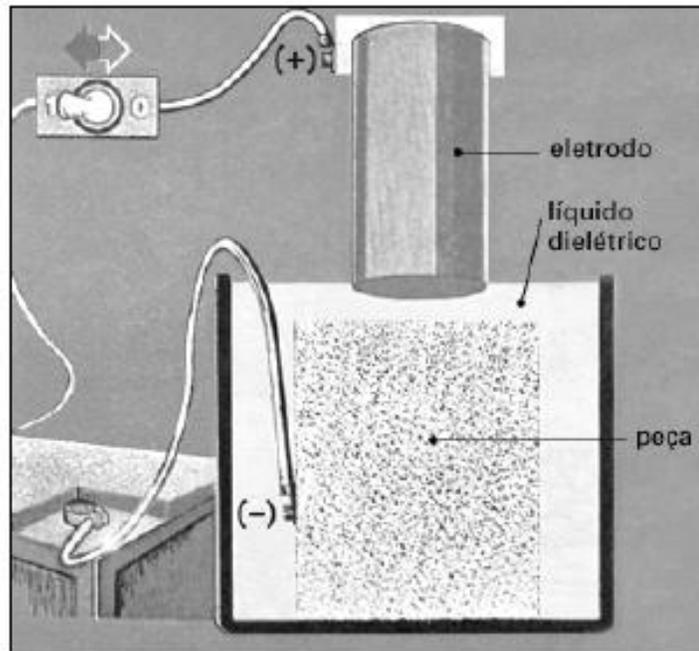


Figura. 2.22 – Processo de Eletroerosão simplificado. (LAUREANO, et al, 2009)

Conforme o espaço entre peça e eletrodo vai diminuindo, até uma distância determinada, o dielétrico passa a atuar como condutor de íons entre o eletrodo e a peça, produzindo então, uma centelha que superaquece a superfície do material dentro do campo de descarga, fundindo-a.

Estima-se que, dependendo da intensidade da corrente aplicada, figura 2.23, a temperatura na região da centelha possa variar entre 2.500°C e 50.000°C, e o material da peça desintegra-se em forma de minúsculas esferas. (Laureano, et al, 2009).

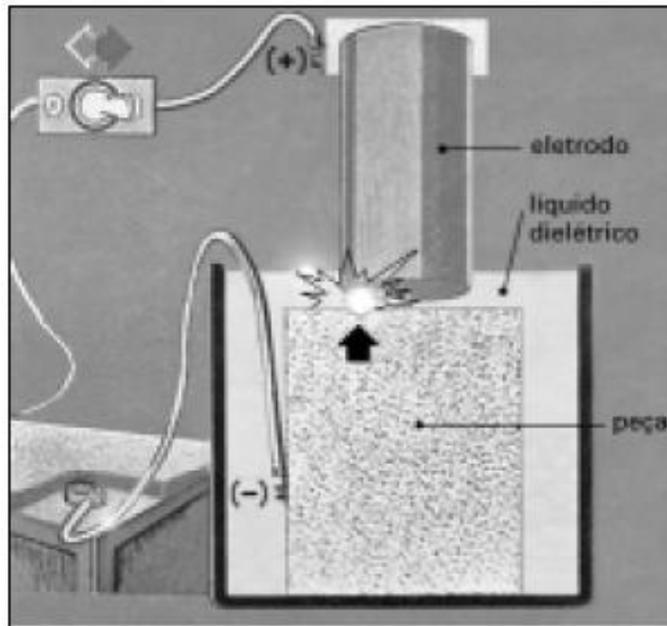


Figura. 2.23 – Obtenção da cavidade no material. (LAUREANO, et al, 2009)

A distância mínima entre a peça e a ferramenta, na qual é produzida a centelha, é chamada GAP (do inglês gap = folga) e depende da intensidade da corrente aplicada. O GAP é o comprimento da centelha. O tamanho do GAP pode influenciar na rugosidade superficial e tempo de usinagem, a seguir na figura 2.24. (Laureano, et al, 2009)

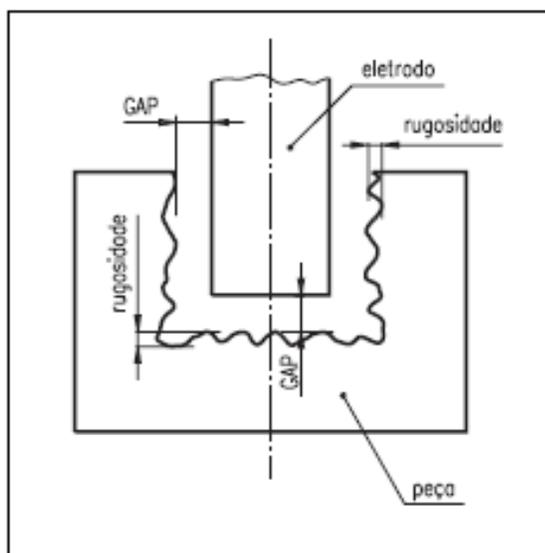


Figura. 2.24 – Cavidade no material. (SENAI-SP, 2003).

As partículas fundidas, desintegradas na forma de minúsculas esferas, são removidas da região por um sistema de limpeza e, no seu lugar, fica uma pequena cratera. O dielétrico, além de atuar como isolante, participa desta limpeza e ainda refrigera a superfície usinada. A frequência das descargas pode alcançar até 200 mil ciclos por segundo. (Laureano, et al, 2009).

## **2.6.2 Aplicação prática de EDM por penetração**

Ziada e Koshy (2007), exemplificam bem a versatilidade de utilização do processo de EDM, bem próximo ao trabalho que está sendo proposta, principalmente pela aplicação, usinagem de polígonos regulares e não regulares.

Quando a disposição de orifícios de descarga na ferramenta ou na peça de trabalho não é prático, a lavagem eficaz é melhor realizado por induzir um movimento relativo entre os eletrodos. Inspirado na cinemática de um triângulo Reuleaux que facilita a lavagem por meio de órbita síncrona de uma ferramenta curvilínea rotativa. (Y. Ziada, P. Koshy, 2007).

Neste trabalho é apresentado de forma inovadora, usinar peças com cavidades complexas girando uma ferramenta curvilínea para obtenção de polígonos com cantos afiados.

As figuras 2.25, 2.26 e 2.27 apresentam os resultados deste processo inovador:

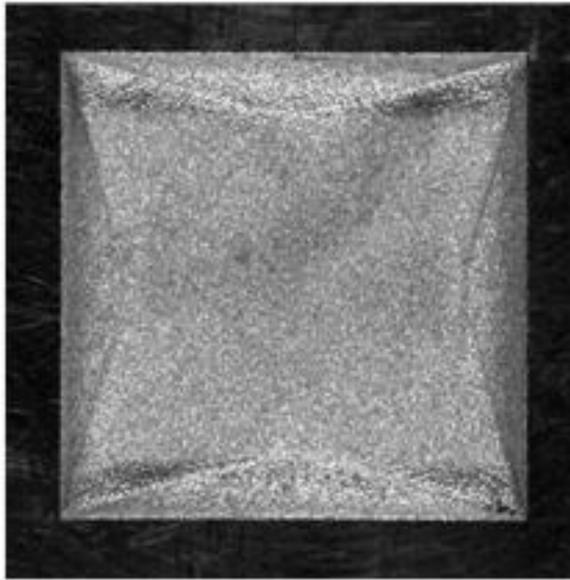


Figura. 2.25 – Usinagem de um quadrado. (Y. Ziada, P. Koshy, 2007)

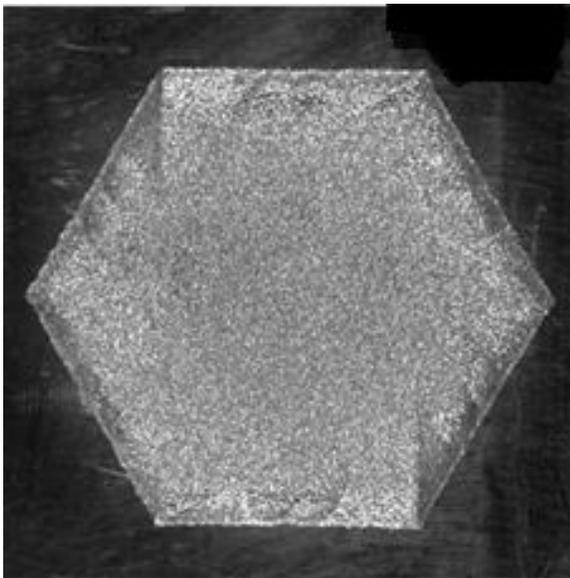


Figura. 2.26 – Usinagem de um Hexágono. (Y. Ziada, P. Koshy, 2007)

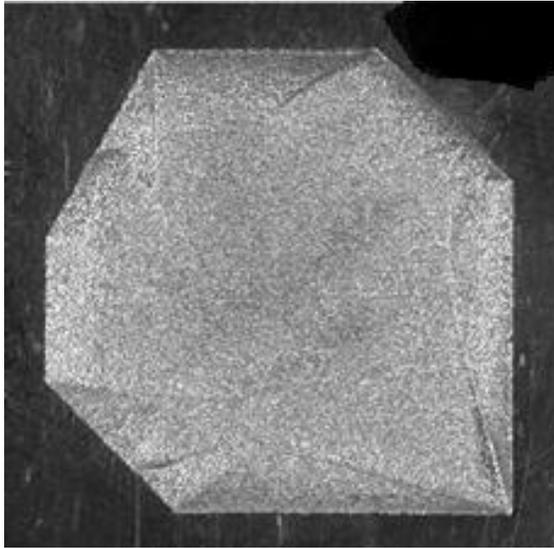


Figura. 2.27 – Usinagem de um Polígono não-regular. (Y. Ziada, P. Koshy, 2007)

### **2.6.3 Eletroerosão à fio**

Os princípios básicos da eletroerosão a fio são semelhantes aos da eletroerosão por penetração.

A diferença é que, neste processo, um fio de latão ionizado, isto é, eletricamente carregado, atravessa a peça submersa em água desionizada, em movimentos constantes, provocando descargas elétricas entre o fio e a peça, as quais cortam o material. Para permitir a passagem do fio, é feito previamente um pequeno orifício no material a ser usinado. (Laureano, et al, 2009).

Atualmente, a eletroerosão a fio é bastante usada na indústria para a confecção de placas de guia, porta-punções e matrizes (ferramentas de corte, dobra e repuxo).

O corte a fio é programado por computador, que permite o corte de perfis complexos e com exatidão, como mostra a figura 2.28.

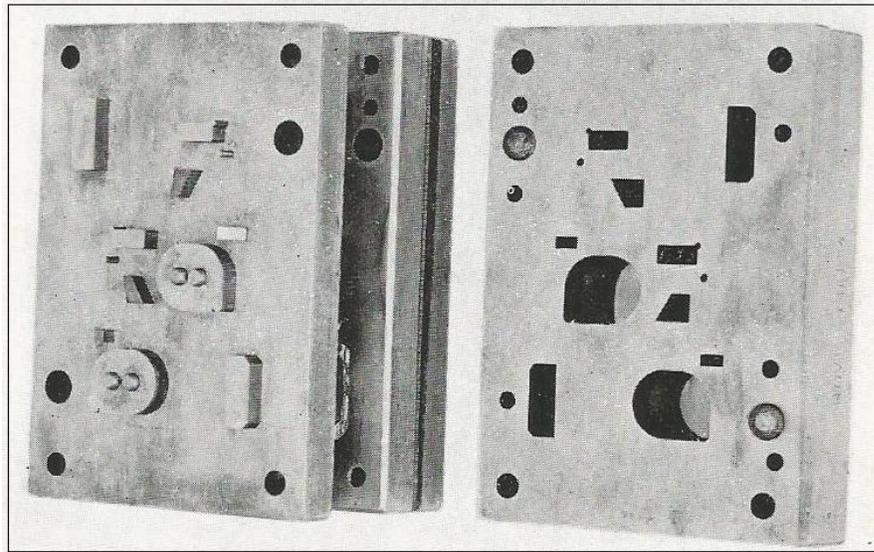


Figura. 2.28 – Peça produzida por Eletroerosão à fio.

#### 2.6.4 Equipamento

Antes de ligar a máquina, é necessário fazer alguns ajustes nos parâmetros de usinagem, fixar corretamente o eletrodo no porta-eletrodo e a peça na mesa de coordenadas, e abastecer o tanque de usinagem de dielétrico. (Laureano, et al, 2009)

As máquinas modernas de eletroerosão apresentam a seguinte configuração básica: Figura 2.29.

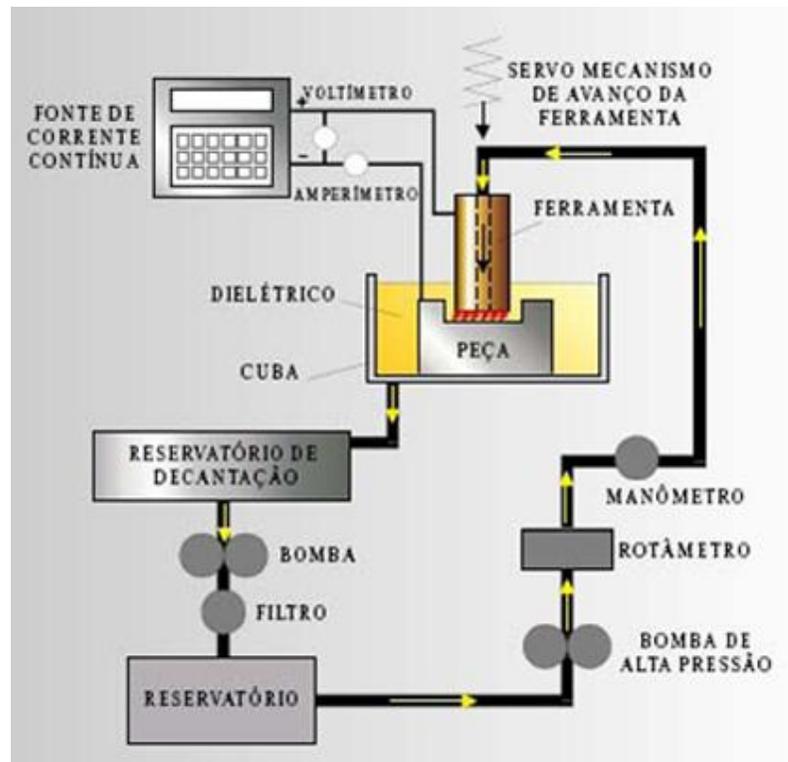


Figura. 2.29 – Configuração de uma máquina de Eletroerosão. (ARANTES, 2001)

O painel de comando e gerador de potência é o “cérebro” da máquina. Nele são determinados todos os parâmetros de usinagem.

O cabeçote é o local onde é fixado o eletrodo ou, eventualmente, a peça. Ele fica preso à coluna da máquina e tem movimentação vertical. O tanque de usinagem é o recipiente onde a peça e o eletrodo permanecem submersos durante o processo de eletroerosão. (Laureano, et al, 2009).

A mesa de usinagem é o local onde a peça é apoiada. Permite fazer dois tipos de avanço: longitudinal e transversal. O reservatório de dielétrico e sistema de filtragem é o recipiente onde fica armazenado o fluido isolante e onde é feita a limpeza dos resíduos gerados no processo. A base é o conjunto que abriga motores e todos os sistemas de transmissão. (Laureano, et al, 2009).

### 2.6.5 A limpeza no Processo

A lavagem, isto é, a circulação do dielétrico entre o eletrodo e a peça usinada, é muito importante porque, durante a usinagem, partículas erodidas tendem a acumular-se em pontos da superfície do eletrodo e da peça.

O acúmulo de grandes quantidades de partículas acarreta diminuição da resistência elétrica, facilitando a formação de descargas anormais, que danificam a peça e o eletrodo.

Para obter maior rendimento, melhor acabamento e menor desgaste do eletrodo, um sistema eficiente de limpeza deve remover essas partículas da zona de trabalho.

Há vários processos e dispositivos de limpeza. A escolha do processo apropriado depende das características da peça e do eletrodo. As figuras 2.30 e 2.31 , apresentam respectivamente, um exemplo de limpeza por injeção e por pressão.

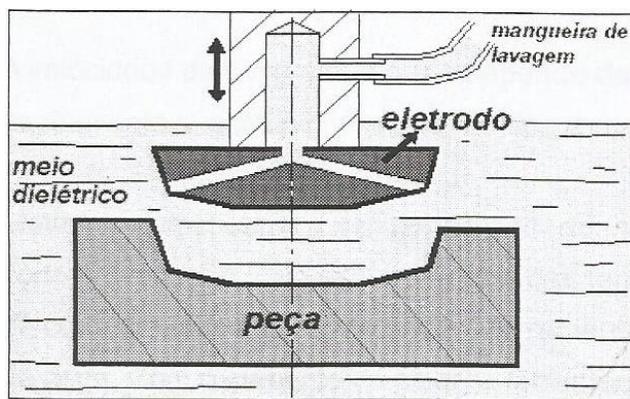


Figura. 2.30 – Limpeza por Injeção. (Laureano, et al, 2009)

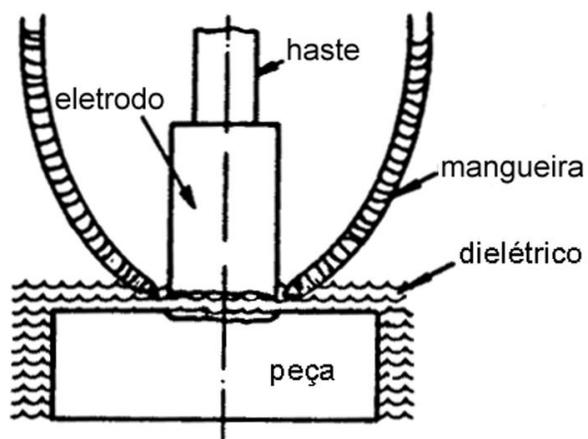


Figura. 2.31 – Limpeza por Pressão. (LAUREANO, et al, 2009)

## 2.6.6 Desvantagem

Há indicações de que uma das principais origens de poluição em usinagens por descargas elétricas de matrizes profundas é o fluido dielétrico, particularmente os óleos hidrocarbonetos.

No momento, não há nenhum processo de manufatura totalmente limpo que possa substituir a EDM. O uso de gás (ar, oxigênio) em EDM poderia ser uma alternativa porque não produz nenhum resíduo e não causa nenhum efeito adverso à saúde. Porém, esta técnica não está desenvolvida o suficiente para ser empregada eficientemente. (Lima, 2007).

A Figura 2.32 mostra o impacto ambiental resultante do uso de usinagem por descargas elétricas (EDM) de matrizes profundas. Segundo Leão et al. (2004), após a usinagem por descargas elétricas existem sedimentos (materiais removidos da peça e da ferramenta), resíduos dielétricos, cartuchos de filtros e resinas deionizadas que necessitam serem descartadas adequadamente para evitar a poluição do solo e rios.

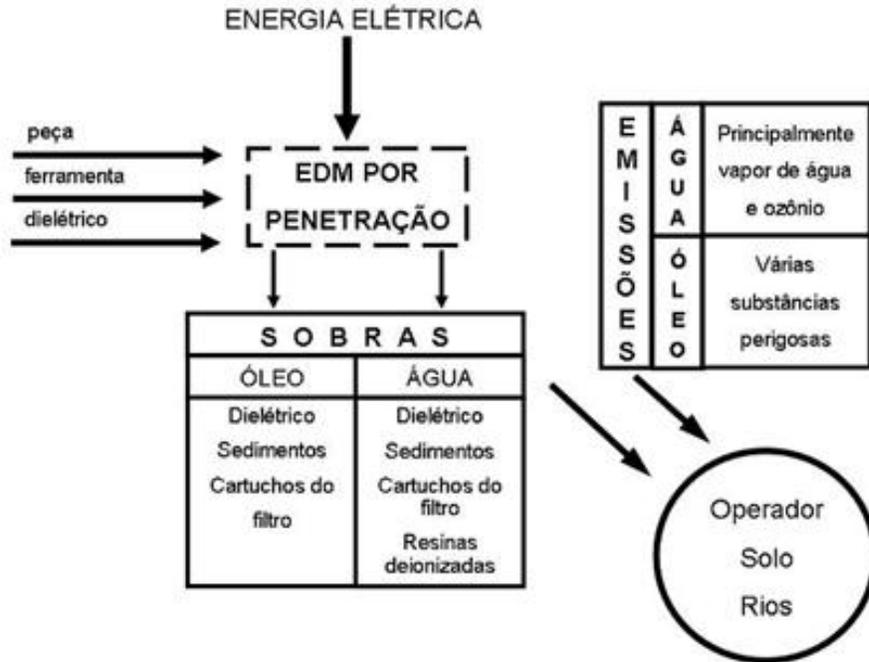


Figura. 2.32 – Impacto ambiental resultante de descargas elétricas de matriz profunda. (LEÃO et al, 2004).

## 2.7 Corte com Jato de água

### 2.7.1 História

Em 1970, o corte por jato de água (Water Jet Cutting – WJC) sob pressão, foi desenvolvido para cortar materiais metálicos e não-metálicos. A água tinha de ser levada a uma pressão variando de 30.000 a 50.000 psi. (Laureano et al, 2009)

Em 1983, o processo para cortar metais foi modificado, com a adição de abrasivos, entre os quais se destacam as partículas de sílica e de granada. Desde a sua comercialização, no início dos anos 80, o jato de água com abrasivo vem sendo aceito como ferramenta de corte por um

número cada vez maior de indústrias, incluindo as aeroespaciais, nucleares, fundições, automobilísticas, de pedras ornamentais, de vidros e de construção. (Secco, 2009).

A seguir a figura 2.33 apresenta uma peça produzida por este processo.

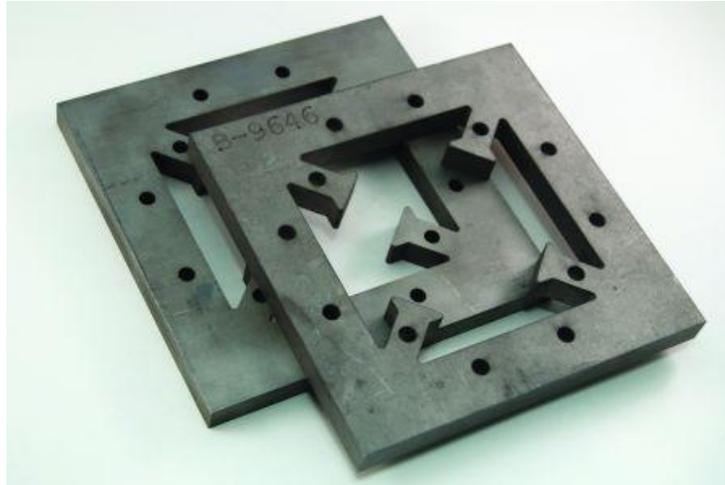


Figura. 2.33 – Peça produzida por Jato de água.  
Disponível em: <http://www.cortejatoagua.com.br>  
Acesso em: 23/01/2014

## 2.7.2 Funcionamento

Para o processo funcionar normalmente é necessário fazer o tratamento da água, ou seja, a água precisa ser filtrada, para ficar livre de impurezas que poderiam ocasionar entupimento dos bicos de corte, pois as impurezas podem afetar o desempenho e a manutenção do sistema de alta pressão. Figura 2.34.

Água filtrada é injetada na bomba intensificadora, a qual pressuriza a água. A tubulação transporta a água até o cabeçote de corte, que libera o jato de água. O abrasivo é dosado e aspirado para dentro do cabeçote de corte sendo misturado com a água e liberado pelo tubo de mistura.

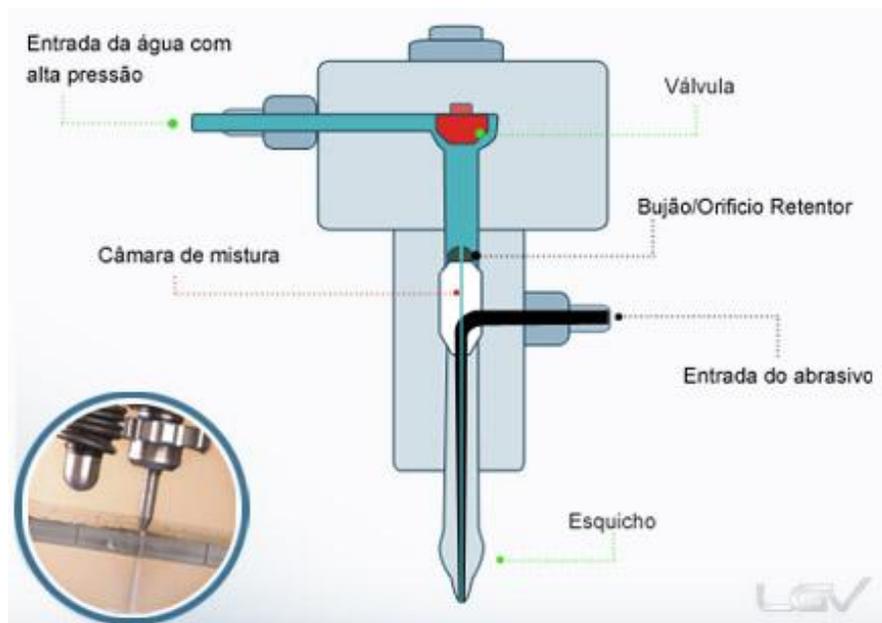


Figura. 2.34 – Mistura da água com abrasivo.  
Disponível em: <http://www.cortejatoagua.com.br>  
Acesso em: 23/01/2014

Segundo SECCO, um ponto importante é a elevação da pressão da água, bombas elevam a pressão da água a aproximadamente 4.000 bar.

A inclusão de material abrasivo é necessário para ter uma capacidade de corte maior. Quando se utiliza a tecnologia do jato de água com abrasivo para cortar metais e outros materiais duros, 90% do corte, na realidade, é feito pelo abrasivo e não pela água. (Secco, 2009).

O jato com alta pressão é expelido pelo bocal em direção ao material e ocorre o corte do material, quando a força do jato supera a resistência à compressão do material. Dependendo das características do material a ser cortado, o corte pode resultar de erosão, cisalhamento ou tensão localizada.

Após atravessar o material, o jato de água é amortecido num tanque, contendo água e esferas de aço ou pedras britadas, que fica sob a mesa do equipamento. Em alguns equipamentos, a água é armazenada em uma unidade coletora móvel. O processo não produz efluentes tóxicos, portanto o descarte pode ser feito normalmente. (Secco, 2009).

### 2.7.3 Equipamentos

Um sistema de movimentação permite manipular o jato em torno da peça. Esses movimentos são realizados por motores elétricos controlados por computador. Outra possibilidade de corte é a movimentação manual.

Os sistemas automáticos de corte podem ser instalados em robôs tipo pórtico de 5 ou 6 eixos, utilizados para fazer perfis complexos, peças aeroespaciais e componentes automotivos. (Laureano et al, 2009). Também, segundo o autor, outro equipamento disponível são as mesas X-Y, controladas por CNC. Nesse sistema, a peça é normalmente colocada sobre um tanque, que receberá o jato de água após o corte.

Durante a operação, as forças de reação são muito leves, ou seja, o material cortado não vibra e não sofre deslocamentos e todos os movimentos são realizados pelo cabeçote, que se desloca sobre o pórtico e pela mesa.

A maior parte dos sistemas de corte utiliza tanques cheios de água e algumas vezes outros meios para absorver a energia do jato depois do corte do material. Para cortes feitos no sentido vertical, ou próximo do vertical, são usados tanques com fundo coberto por pedras britadas.

Em sistemas de 5 eixos, normalmente é necessário utilizar um recipiente móvel, que se movimenta junto com o cabeçote de corte. Esse recipiente é parcialmente cheio com esferas de aço inoxidável ou de cerâmica, que absorvem e dissipam a força do jato. Essas esferas devem ser substituídas periodicamente, pois são destruídas pelo processo. (Laureano et al, 2009).

## 2.7.4 Variáveis de corte

A tabela 2.1 apresenta vários fatores que influenciam o corte por jato de água pura e com abrasivo.

Tabela 2.1 – Influência das Variáveis no processo de corte por jato de água.

VARIÁVEIS	INFLUÊNCIA
Pressão	Quanto maior a pressão, mais fácil de cortar.
Fluxo	O fluxo de água determina o índice de remoção do material.
Diâmetro do jato	O diâmetro do bico de corte para sistemas de corte por água pura varia de 0,5 mm a 2,5 mm.
Abrasivo	A velocidade de corte do sistema é aumentada quando se aumenta o tamanho da granulação do abrasivo. Quanto mais duro for o abrasivo, mais rapidamente se desgasta o bico de corte.
Distância e velocidade de corte	À medida que sai do bico, o jato de água se abre. Isso explica porque a distância entre o bico e o material é sempre muito pequena, abaixo de 1,5 mm.

## 2.7.5 Analisando os Prós e contras

Ao lado de muitas vantagens, o sistema também apresenta algumas limitações, que tornam seu uso seletivo. A seguir serão listadas as vantagens e as desvantagens do processo de corte por jato de água. (Secco, 2009).

### Vantagens:

- Versatilidade – Corta todos os tipos de materiais em até 270 mm de espessura.
- Não tem zona termicamente afetada.

- Bordas de alta qualidade.
- O processo pode ser executado por sistemas de movimentação (robôs, manipuladores).
- Elimina operações secundárias.
- Permite trabalhar com materiais empilhados.
- Não danifica o meio ambiente.

#### **Desvantagens:**

- Velocidade do processo de corte reduzido.
- Quanto mais duro o abrasivo, mais caro.
- Somente cortes passantes.
- Chapas de pequenas espessuras tendem a dobrar formando rebarbas na face de saída.

Mesmo com todas essas desvantagens, a expectativa das empresas produtoras de sistemas de corte por jato de água é a de apresentar soluções às exigências do crescente mercado consumidor.

## **2.8 Corte a LASER**

A palavra LASER, que na verdade se trata de uma sigla, vem do inglês (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), que em português significa amplificação da luz por emissão estimulada da radiação, que representa um feixe de luz de alta energia. (Laureano, et al, 2009).

Para ficar fácil o entendimento sobre o funcionamento do LASER, basta lembrarmos o que acontece quando focalizamos raios de sol através de uma lente, sobre uma folha de papel. A partir deste experimento dá para perceber que a luz é realmente uma fonte de energia com potencial e condições de serem exploradas pelas indústrias. (Laureano, et al, 2009).

O LASER ou feixe de luz, pode ser obtido por excitação dos elétrons de determinados átomos, utilizando um veículo ativo que pode ser um sólido (o rubi) ou um líquido (o dióxido de carbono sob pressão). Este feixe de luz produz intensa energia na forma de calor.

Nos dias atuais, as indústrias utilizam muito o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como veículo ativo, mas outros gases, como o nitrogênio (N<sub>2</sub>) e o hélio (H), também podem ser misturados ao dióxido de carbono para aumentar a potência do LASER. (Secco, 2009).

### 2.8.1 Forma de geração do LASER

Colocando-se a fonte emissora numa cavidade ótica e usando espelhos para concentrar a luz (ver fig. 2.35), a energia é capturada na fonte e vai sendo submetida a sucessivas reflexões internas, até que um feixe de luz altamente amplificado é emitido. (Ferraresi, 1973).

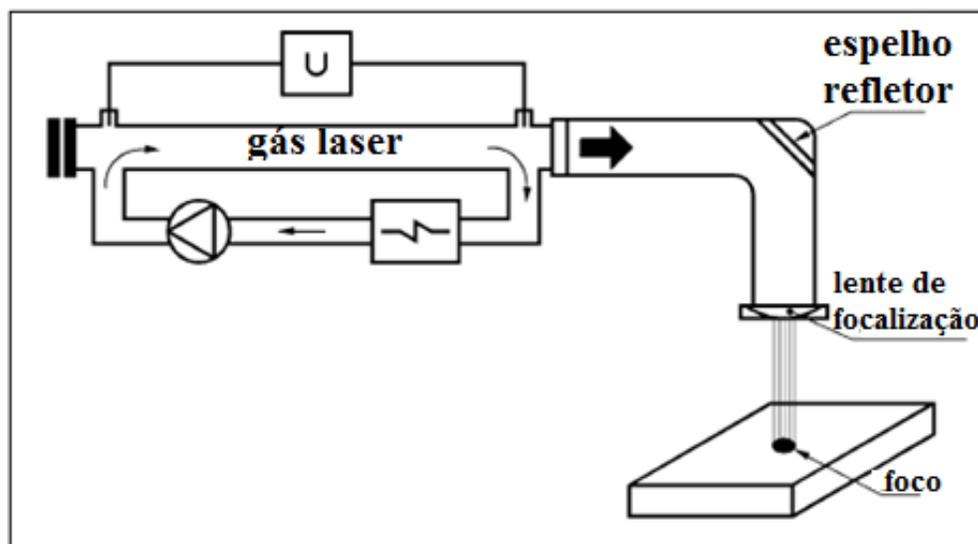


Figura. 2.35 – Sistema de formação do LASER. (LAUREANO, et al, 2009)

O direcionamento permite a concentração de energia em um ponto inferior a 0,25 mm de diâmetro. O sistema de corte a laser combina o calor do raio focado com a mistura de gases (dióxido de carbono, nitrogênio e hélio) para produzir uma potência que chega a cerca de 3.000

watts por centímetro quadrado, capaz de vaporizar a maioria dos metais. O hélio auxilia ainda na dissipação do calor gerado pelo campo elétrico. (Laureano, et al, 2009)

Os quatro tipos básicos de LASER utilizados em operação e os meios ativos são:

- estado sólido (rubi ou vidro com inclusões de neodímio);
- estado gasoso (dióxido de carbono);
- estado líquido (solução aquosa com corantes);
- semicondutores (compostos de gálio).

## **2.8.2 Máquinas de corte a LASER**

As máquinas de corte a LASER dependem de diversos fatores de utilização e propriedades que são:

- a) Quanto a retilineidade do feixe e velocidade de propagação podemos citar as seguintes aplicações: alinhamentos precisos, interferometria e medidas de distâncias.
- b) Quanto a geração de calor pela focalização do feixe: corte, solda, microusinagem, vaporização.

O processo de corte a LASER envolve alta concentração de energia, portanto não deve ser operado manualmente. Os equipamentos mais comuns consistem em mesas móveis com capacidade de movimentação nos eixos x,y e z, coordenados por um sistema CAD (Computer Aided Design ou, em português, projeto assistido por computador). (Secco, 2009).



Figura. 2.36 – Máquina de corte a LASER  
Disponível em: <http://portuguese.powerpress-machine.com>  
Acesso em: 24/01/2014

Muitos materiais cortados a LASER encontram-se em forma de chapas, porém há também a utilização das máquinas para corte de tubos.

Pelo cabeçote laser flui um gás, chamado gás de assistência, que tem por função, entre outras, remover o material fundido e óxidos da região de corte. O gás normalmente utilizado para esta finalidade é o oxigênio, porque ele favorece uma reação exotérmica, isto é, libera calor, aumentando ainda mais a temperatura do processo e, por consequência, a velocidade de corte. (Secco, 2009).

### 2.8.3 Fatores importantes

As impurezas na mistura de gases podem reduzir o desempenho do laser de CO<sup>2</sup>, diminuindo a potência de saída, tornando a descarga elétrica instável ou aumentando o consumo dos gases. (Ferraresi, 1973).

Outro fator importante é a potência do feixe, que determina a capacidade do laser de interagir com o material a ser cortado e iniciar o corte. Normalmente, o aumento da potência de corte permite cortar materiais com espessuras maiores, mantendo a qualidade e aumentando a velocidade de corte. (Ferraresi, 1973).

Segundo Ferraresi, a velocidade de corte deve ser determinada em conjunto com a potência e a pressão e vazão do gás de assistência. Valores muito elevados de velocidade tendem a produzir estrias na superfície de corte, rebarbas na parte posterior da superfície atingida pela radiação e até mesmo impossibilidade de realizar o corte.

Velocidades baixas, por outro lado, produzem um aumento da zona termicamente afetada e um decréscimo na qualidade do corte. (SECCO, 2009).

Para materiais não metálicos, a vazão do gás de assistência pode ser mais elevada.

#### **2.8.4 Indicações de Uso**

A utilização do corte a LASER é indicada quando a forma das peças apresentam geometrias complicadas de serem usinadas e que seja necessário um acabamento de superfície sem rebarbas. Por ser um processo onde não há necessidade de ter estampos de corte, é possível lotes pequenos e diversificados rapidamente.

O fato de o laser de CO<sup>2</sup> gerar uma imensa intensidade de calor não significa que ele possa vaporizar e cortar todos os metais conhecidos, pois cada material reage de forma diferente a esse tipo de energia. (Secco, 2009).

A tabela 2.2 apresenta comentários sobre o comportamento de alguns materiais em relação ao corte a laser.

Tabela 2.2 – Tipos de Materiais e suas aplicações no corte a LASER.

<b>MATERIAIS</b>	<b>APLICAÇÕES</b>
Aços não ligados	Podem ser facilmente cortados a laser.
Aços inoxidáveis	Chapas finas podem ser cortadas com excelente resultado.
Aços-ferramenta	São difíceis de cortar por outros métodos convencionais, por causa do alto teor de carbono, mas apresentam boa qualidade de superfície, quando cortados a laser.
Alumínio e suas ligas	A espessura máxima que pode ser cortada a laser situa-se por volta de 4 mm a 6 mm, pois, como já foi dito, o alumínio reflete a luz e é bom condutor de calor, dificultando a concentração de energia.
Cobre e suas ligas	Assim como o alumínio, também apresenta tendência a refletir a luz, é extremamente importante a proteção contra radiação refletida.
Titânio e suas ligas	Pode ser cortado a laser, desde que a zona de corte seja protegida por um gás inerte (CO <sub>2</sub> , He, N <sub>2</sub> ), que evita a oxidação pelo ar.
Outros materiais	O laser corta ainda vários outros materiais não-metálicos como: polímeros, têxteis, couro, cerâmica, rochas etc.

## 2.8.5 Vantagens e Desvantagens

Como em todo processo de usinagem, o corte a LASER também tem suas vantagens e limitações que podem ser facilmente comparadas com outros processos utilizados para usinagem.

Tabela 2.3 – Vantagens e Desvantagens no processo de corte a LASER.

<b>VANTAGENS</b>	<b>DESvantagens</b>
Ausência de contato direto e de grandes esforços entre a peça e a ferramenta.	Alto investimento de capital e custo de operação.
Aplicação em qualquer material conhecido.	Aplicação limitada (peças delgadas ou remoção de pequenas quantidades de material).
Capacidade de operar através de ar, gases inertes, vácuo, líquidos e sólidos com transparência ótica.	Pequena taxa de remoção de material.
Precisão e capacidade de executar furos e cortes de pequenas dimensões.	Pequena conversão de energia elétrica em calor.
Conveniência para o corte de cerâmica e outros materiais sensíveis a choques.	Necessidade de operadores especializados.
Possibilidade de controle da taxa de remoção do material da peça.	Danificação da peça pelo calor

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentado o modelo matemático necessário para obtenção dos pontos coordenados a serem programados na máquina para executar a trajetória da ferramenta e possibilitar a usinagem do furo quadrado e conseqüentemente possíveis correções no programa.

#### 3.1 Modelo Matemático

Para uma ferramenta usinar furos quadrados, pentagonais e hexagonais, se faz necessário antes de tudo conhecer geometria, pois todas elas derivam a sua forma a partir de uma construção geométrica simples, conhecido como triângulo de Reuleaux. (Cox, 2012).

Para construir um triângulo de Reuleaux, é necessário iniciar com um triângulo equilátero de lado  $s$  (fig. 3.1). Com um raio igual a  $s$  e o centro de um dos vértices, desenhe um arco conectando os outros dois vértices.

Faça da mesma forma para os outros dois vértices. Uma das propriedades é da "*largura constante*", significa que a figura pode ser rotacionada completamente entre duas linhas paralelas separadas por uma distância  $s$  e sempre terá a mesma tangente para cada uma delas. (Smith, 1993).

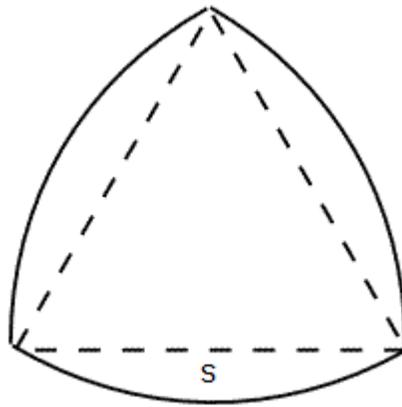


Figura. 3.1 - Triângulo de Reuleaux

No triângulo de Reuleaux na figura 3.2, o único ponto cabível de ser chamado de centro do triângulo é o baricentro. Se os lados do triangulo equilátero são s, então aplicando a propriedade de que o centro é dois terços a distancia de um vértice para os lados opostos, então:

$$AP = \frac{2}{3} \times \frac{s}{2} \times \sqrt{3} = \frac{\sqrt{3}}{3} s = 0.577 s \quad (1)$$

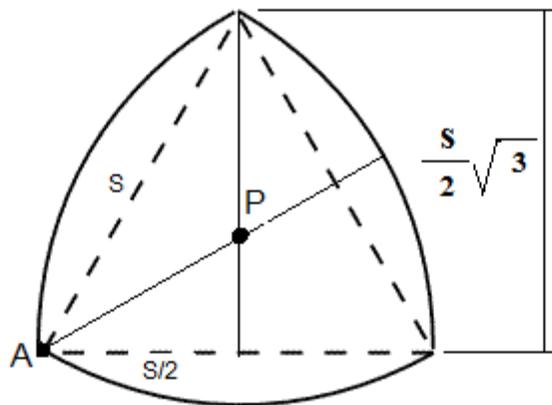


Figura. 3.2 - Baricentro do Triângulo de Reuleaux

O cálculo do baricentro do triângulo se faz necessário para encontrar o posicionamento inicial da ferramenta antes de realizar a usinagem.

Para encontrar as equações que descrevem a trajetória da ferramenta é preciso saber o caminho percorrido pelo centro do triângulo de Reuleaux enquanto ele está furando um furo quadrado, descritas a seguir na figura 3.3.

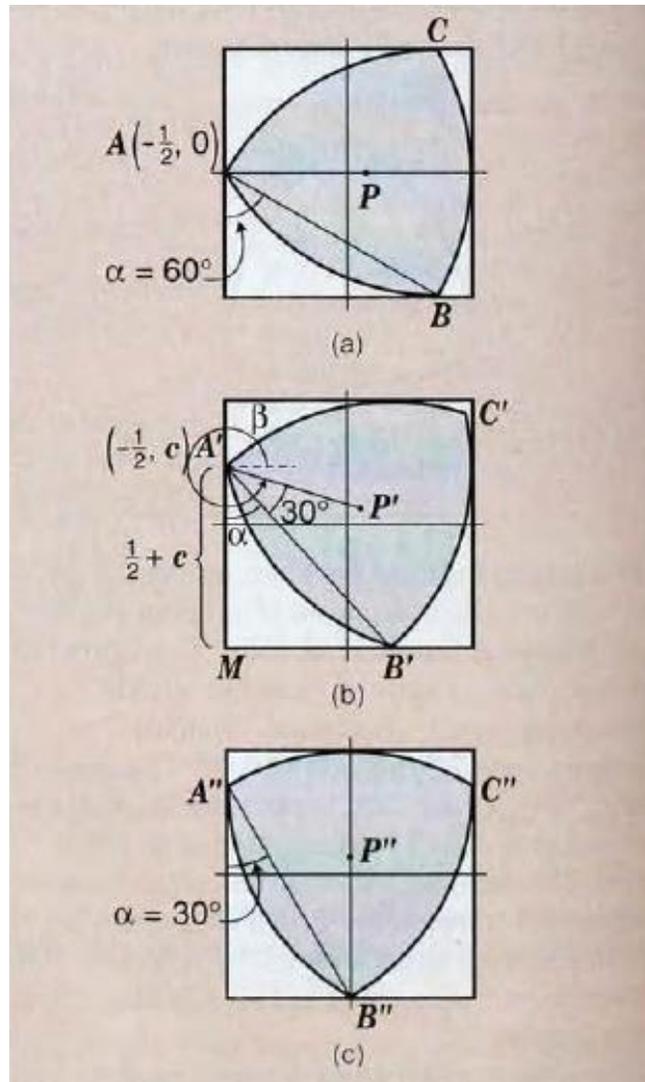


Figura. 3.3 - Triângulo de Reuleaux girando dentro do quadrado. (Smith, 1993).

Assumindo que o quadrado e o triângulo de Reuleaux possuem os lados com medida igual a 1. O centro do quadrado sobre a origem e a posição do triângulo de Reuleaux é dado pelo vértice A que é  $(-1/2, 0)$ , assim como na figura 3.3a.

Usando (1), o centro do triângulo, seria P  $(-1/2 + \text{raiz de } 3/3, 0)$ . “A próxima imagem do triângulo girando em sentido horário na posição da figura 3.3b, terminaria na figura 3.3c, onde o centro é P”  $(0, -1/2 + \text{raiz de } 3/3)$ .

O caminho de P e P" está no quadrante I. Na figura 3.3b sendo  $\alpha$   $m < MA'B'$ , e  $\beta$  sendo o ângulo no sentido anti horário formado por A' P' e a linha horizontal por A' , e c sendo a coordenada y do ponto A'. (Smith, 1993)

Assim sendo, o maior interesse está nas coordenadas de P' . Note que:

$$\cos \alpha = 1/2 + c \text{ e que } \beta = 270^\circ + \alpha + 30^\circ = 300^\circ + \alpha$$

De acordo com Smith, durante esta rotação da figura 3.3a para 3.3b, o ângulo de inclinação do lado da ferramenta em relação ao lado do quadrado vai de 60 graus para 30 graus. Desde A' P' = raiz de 3/3, se medir as coordenadas de A'  $(-1/2, c)$ , as coordenadas de x e y de P' pode encontrar:

$$x = \frac{-1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos(300^\circ + \alpha)$$

(2)

$$= \frac{-3 + \sqrt{3} \cos \alpha + 3 \sin \alpha}{6}$$

e

$$\begin{aligned}
y &= c + \frac{\sqrt{3}}{3} \text{sen}(300^\circ + \alpha) \\
&= \left( \cos \alpha - \frac{1}{2} \right) + \frac{\sqrt{3}}{3} \text{sen}(300^\circ + \alpha) \\
&= \frac{-3 + 3 \cos \alpha + \sqrt{3} \text{sen} \alpha}{6}
\end{aligned} \tag{3}$$

As equações acima, descrevem a trajetória do triângulo de Reuleaux com a medida do lado igual a medida do lado do quadrado que se deseja furar.

Para fazer furos quadrados com ferramentas de lado menores à medida do lado do quadrado, que é a proposta do presente trabalho, se faz necessário adequar as equações acima para tal objetivo.

Sendo:

“**d**”, o lado da broca de Reuleaux

“**D**”, o lado do furo quadrado que se quer produzir, onde  $d < D$

“ **$\alpha$** ”, o ângulo formado entre o lado da broca e o lado do furo, em radianos.

As equações (2) e (3), podem ser reescritas da seguinte forma:

$$x = \frac{1}{6} (-3D + (d\sqrt{3} \cdot \cos \alpha) + (3d \cdot \text{sen} \alpha)) \tag{4}$$

$$y = \frac{1}{6} (-3d + (3D \cdot \cos \alpha) + (D\sqrt{3} \cdot \text{sen} \alpha)) \tag{5}$$

Quando a ferramenta possui o lado “d”, medida menor que a medida “D” do quadrado, é necessário considerar o deslocamento da ferramenta em y, para isto segue a equação abaixo para o cálculo de deslocamento.

$$Desl(y) = \frac{D-d}{60} \quad (6)$$

E então a equação (5) fica:

$$y = \frac{1}{6} (-3d + (3D \cdot \cos \alpha) + (D\sqrt{3} \cdot \sen \alpha)) - (Desl(y) \times n) \quad (7)$$

Onde “n”, é o número de vezes que a ferramenta se desloca ao longo da trajetória do furo quadrado.

A geração de um quadrado com cantos afiados é explicado a partir das sucessivas modificações de posições do triângulo de Reuleaux, modificando o deslocamento do seu centro P.

No quadrado produzido por uma ferramenta com medida menor e igual à medida do quadrado, o seu ângulo varia entre 60° e 15°, em ambos os casos, porém o que diferencia um do outro é o deslocamento na componente Y, necessário para obter o canto do quadrado com 90°. Quando o lado da ferramenta é menor que a medida do lado do quadrado, é necessário calcular o deslocamento da variável Y.

Assim, o mesmo movimento do primeiro quadrante rotacionado 4 vezes ao longo do caminho obtém o quadrado por simetria completa.

## 4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Ferramenta

A construção da ferramenta utilizada para os experimentos tem como inspiração o triângulo de Reuleaux, já ilustrado no capítulo anterior. Em trabalhos já existentes, a distância em linha reta de um vértice ao outro do triângulo de Reuleaux será o tamanho do quadrado a ser obtido. No caso do presente trabalho, o lado do triângulo de Reuleaux, pode ser menor que o lado do quadrado.

As etapas de confecção da ferramenta, figura 4.1, especialmente desenvolvida para este processo, seguem basicamente os mesmos passos para a construção de uma fresa de topo. Assim, se faz necessário a usinagem dos sulcos para saída de cavaco e a afiação das arestas de corte.

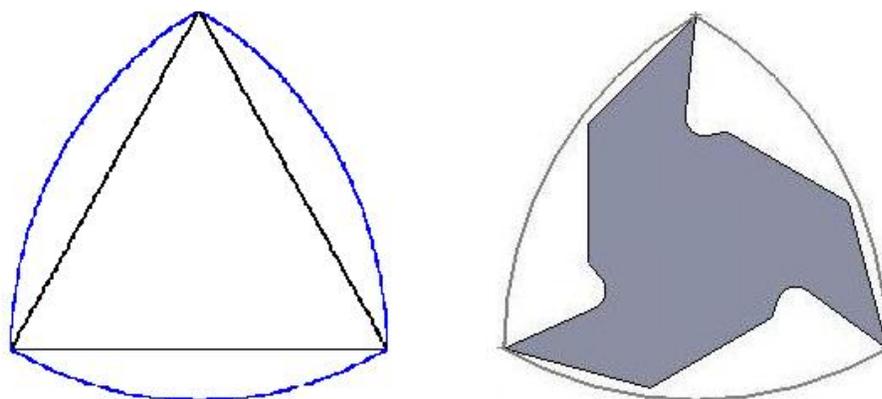


Figura. 4.1 - Etapas de construção da ferramenta

A ferramenta possui 3 arestas de corte, figura 4.2, com o lado do triângulo de Reuleaux medindo 10mm, e o material utilizado para a confecção da mesma foi o Aço Rápido HSS.

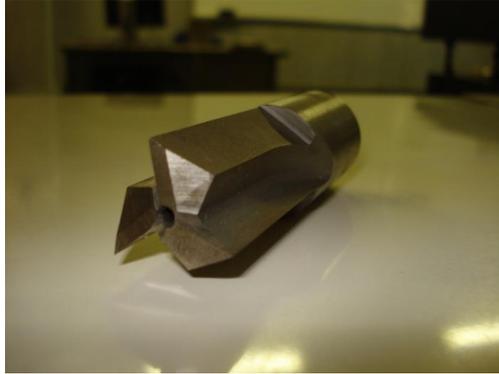


Figura. 4.2 - Ferramenta utilizada na usinagem do furo quadrado

## 4.2 A Máquina

A principal capacidade que uma máquina CNC deve possuir para realizar a usinagem de um furo quadrado é a capacidade de sincronizar o movimento de rotação com o movimento de translação. A figura 4.3 a seguir ilustra bem o funcionamento da máquina CNC com o sincronismo de movimentos entre o eixo rotativo e os dois eixos lineares X e Y, responsáveis pelo movimento de translação e também o movimento linear em Z capaz de dar profundidade ao furo.

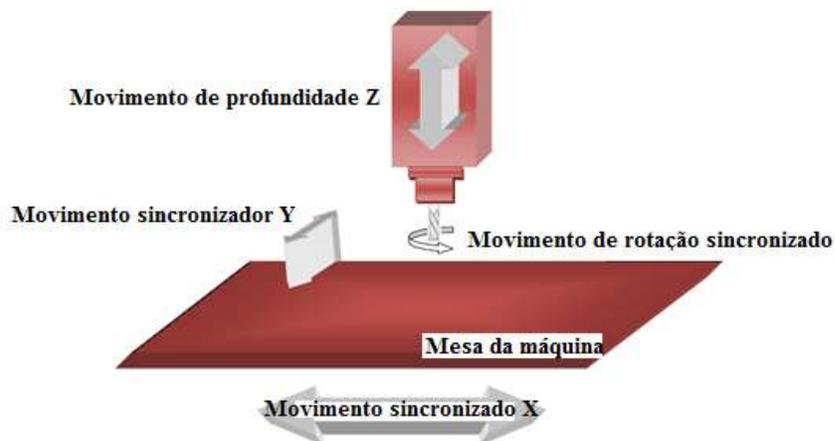


Figura. 4.3 – Sincronia de movimentos na máquina ferramenta CNC. (CASTRO,2012)

A configuração descrita na figura 4.3, foi o modelo de fixação e movimento de rotação da ferramenta para a realização dos experimentos do presente trabalho. Deste modo a fixação da ferramenta é feita no próprio eixo-árvore e a peça a ser usinada fixada na morsa, de acordo com a fixação padrão.

O equipamento utilizado para a realização dos experimentos foi o Centro de Usinagem da fabricante ROMI, modelo Discovery 760. Centro de Usinagem 3 eixos, comando Siemens 810D.



Figura. 4.4 - Centro de Usinagem ROMI - Discovery 760

. Para a realização dos experimentos se faz necessário a programação da máquina com os pontos das coordenadas, que foram obtidos com a ajuda do Software Microsoft Excel para determinar a trajetória da ferramenta.

As programações foram digitadas no próprio comando da máquina, porque não existem softwares CAM com comando para a realização de furos poligonais. Assim o movimento de rotação é dado pelo eixo-árvore programado como eixo C, e o movimento de translação é executado pela combinação dos eixos X e Y em sincronia com o eixo C. A tabela 4.1 a seguir apresenta os parâmetros do centro de usinagem.

Tabela 4.1 – Condições do experimento no Centro de Usinagem.

<b>Velocidade máxima do eixo rotativo</b>	<b>4000 RPM</b>
<b>Incremento angular do eixo C</b>	<b>3°</b>
<b>Tipo de interpolação da trajetória do centro da ferramenta</b>	<b>Linear</b>
<b>Quantidade de pontos percorridos para completar a translação</b>	<b>120</b>
<b>Velocidade máxima dos eixos lineares</b>	<b>24 m/min</b>

### **4.3 Material**

O material utilizado como corpo de prova foi o plástico branco PP (Polipropileno), com um pré-furo cilíndrico e espessura de 10mm. O pré-furo se faz necessário para retirar o material na região do centro da ferramenta onde não ocorre.

O uso deste material diminui os esforços de corte, evitando assim, uma possível quebra e conseqüentemente o atraso na realização dos experimentos, e também por outros fatores como refrigeração de corte, geração de cavaco, entupimento das saídas de material, vibração, etc.

Nada impede que se desenvolva ferramentas mais reforçadas, ou que utilize a mesma para a usinagem de materiais metálicos, pois os parâmetros utilizados para confecção da ferramenta é o mesmo de ferramentas convencionais.

### **4.4 Posição Inicial da Ferramenta**

No presente trabalho o objetivo é usinar furos quadrados com a medida do lado do quadrado, maior que a medida do lado da ferramenta, visto que em trabalhos anteriores a este, o lado do quadrado era da mesma medida do lado da ferramenta.

Para realizar tal operação é necessário inicialmente posicionar o centro da ferramenta P, baricentro do triângulo, com o centro do quadrado, e depois deslocar a ferramenta até o ponto inicial de usinagem, em X e Y, como mostra a figura 4.5. Este ponto inicial de posicionamento dependerá da medida da ferramenta e da medida do quadrado e o corte da ferramenta na peça se iniciará no ponto A.

É importante destacar que a posição inicial da ferramenta é também um fator muito importante na obtenção de um furo quadrado com geometria de qualidade.

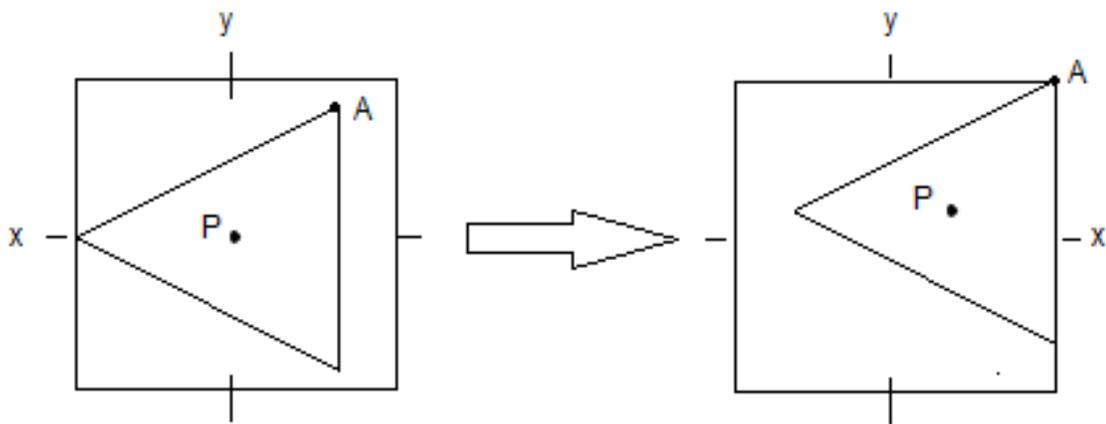


Figura. 4.5 - Posicionamento inicial da ferramenta

## 4.5 Os experimentos

Os experimentos foram divididos em duas etapas, a primeira etapa consistia em obter os pontos coordenados segundo as equações da modelagem matemática, programação na máquina e usinagem do furo quadrado, e a segunda etapa, verificar a evolução do processo em um problema de aplicação.

### 4.5.1 Primeira Etapa

Na primeira etapa foram usinados 4 furos, para verificar se era possível usinar furos quadrados de diferentes medidas com a mesma ferramenta, conforme tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Medida do Quadrado e medida da Ferramenta utilizada nos experimentos.

<b>MEDIDA DO QUADRADO</b>	<b>MEDIDA DA FERRAMENTA</b>
13 mm	10 mm
17 mm	10 mm
22 mm	10 mm
24 mm	10 mm

### 4.5.2 Segunda Etapa

Na segunda etapa dos experimentos, o objetivo é poder fazer correções no programa para acertar a trajetória da ferramenta e consequentemente obter a geometria esperada do furo quadrado, quando a ferramenta apresentar desgaste ou medidas menores às medidas programadas na máquina.

Para este experimento a ideia é simular um possível erro, programar a máquina para uma medida de ferramenta, mas no eixo-árvore da máquina colocar uma ferramenta com medida diferente à medida programada. Para este experimento também foram realizados mais 4 furos conforme tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Condições para a realização dos experimentos.

<b>FURO</b>	<b>MEDIDA DO QUADRADO</b>	<b>MEDIDA DA FERRAMENTA</b>	<b>MEDIDA DA FERRAMENTA NO SPINDLE</b>
1	12 mm	12	10 mm
2	15 mm	15	10 mm
3	14 mm	14	10 mm
4	20 mm	20	10 mm

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na primeira etapa dos experimentos, a proposta do presente trabalho, era desenvolver um processo para obtenção de furos poligonais de diferentes medidas com uma única ferramenta, desde que a medida do quadrado tenha a medida do lado igual ou maior a medida da ferramenta.

A partir dos ensaios realizados, ficou comprovado que o modelo matemático desenvolvido mostrou-se capaz de realizar os furos. Mas outra questão importante é a qualidade do furo, ou seja, a geometria obtida quanto à forma e dimensão, e para sua avaliação, foi utilizado um Projetor de Perfil para fazer as medições.

### 5.1 Geometria obtida

Os ensaios de geometria, apesar de já citados anteriormente, foram executados no Centro de Usinagem 3 Eixos, em material plástico (PP) branco com 10mm de espessura fixado em uma morsa na mesa da máquina, com fixação da ferramenta no eixo-árvore na posição vertical. Todos os furos quadrados foram usinados com uma ferramenta de medida 10mm.

A programação para este furo foi feita conforme os parâmetros que seguem:

- Incremento angular de rotação da ferramenta:  $3^\circ$
- Quantidade de pontos percorridos para compor a trajetória de translação: 120

A seguir, as figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentarão os resultados obtidos na usinagem dos respectivos furos quadrados.

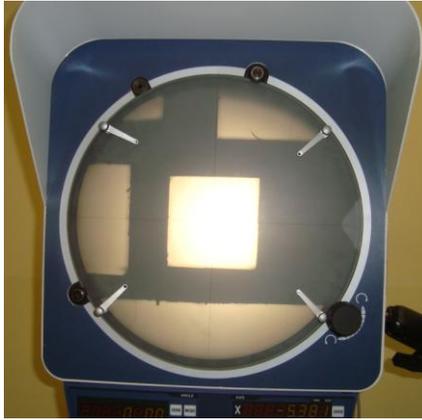


Figura. 5.1- Furo quadrado de 13 mm.

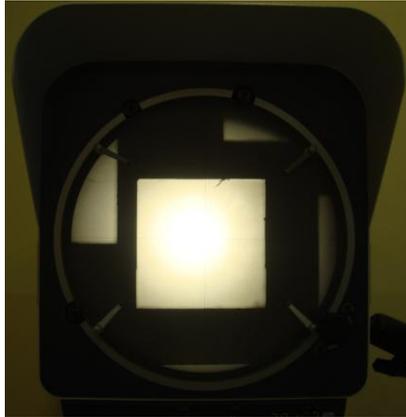


Figura. 5.2- Furo quadrado de 17 mm.

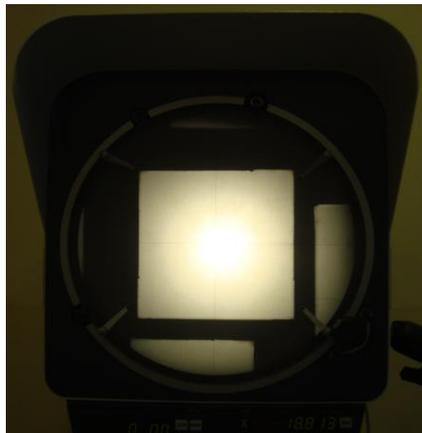


Figura. 5.3- Furo quadrado de 22 mm.

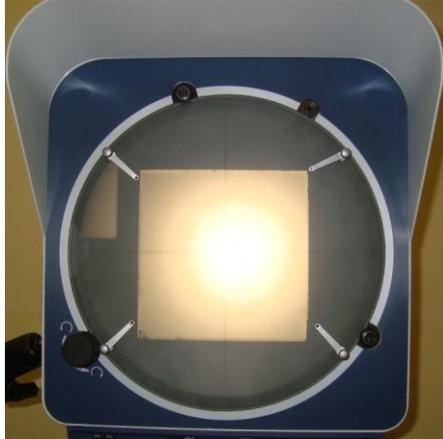


Figura. 5.4- Furo quadrado de 24 mm

As medições quanto à forma e dimensão foram feitas no projetor de perfil, de acordo com a representação esquemática mostrada na figura 5.5 e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.1.

- Dimensões lineares: X, Y e R (Raio).
- Dimensões geométricas (Forma): Lados A, B, C e D.

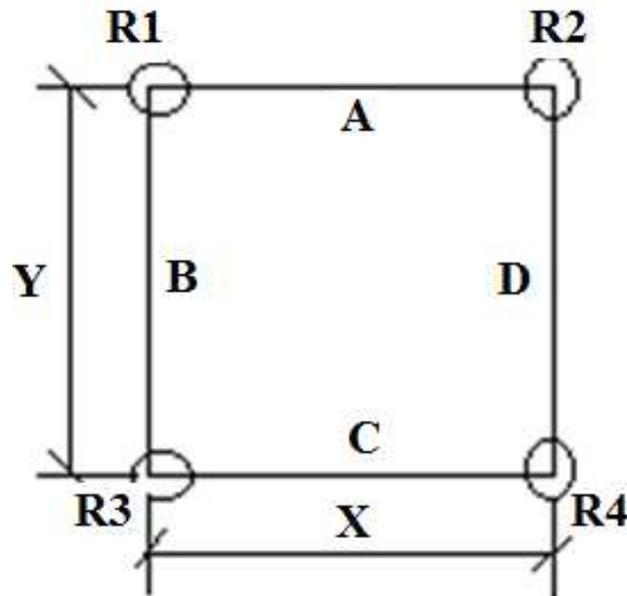


Figura. 5.5 - Esquema de medição para os furos.

Tabela 5.1 – Valores obtidos nos ensaios dos furos quadrados.

Medida do	Dimensões Lineares (mm)						Dimensões Geométricas			
							Desvio de Forma			
Furo (mm)	X	Y	R1	R2	R3	R4	A	B	C	D
13	13.025	13.017	0.011	0.012	0.010	0.027	0.041	0.028	0.025	0.038
17	17.030	17.027	0.058	0.008	0.009	0.011	0.015	0.033	0.028	0.035
22	22.021	22.008	0.033	0.030	0.028	0.022	0.044	0.025	0.023	0.032
24	24.001	24.009	0.011	0.027	0.017	0.016	0.014	0.011	0.010	0.012

A partir das medições realizadas, das observações quanto à geometria e o material utilizado na usinagem, pode-se concluir que os resultados foram satisfatórios.

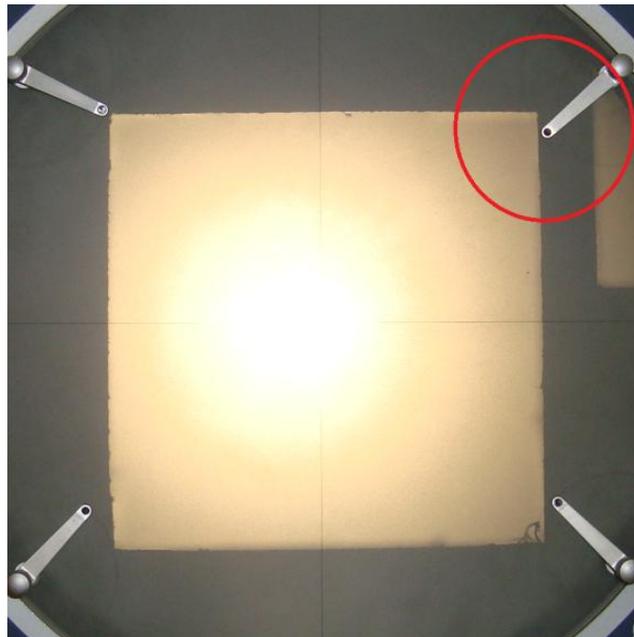


Figura. 5.6 – Obtenção de canto afiado no quadrado

Há uma incompatibilidade nas medidas dos raios nos cantos dos quadrados, que apesar de serem valores baixos, apresentaram valores diferentes. Esse pequeno erro pode ter sido

ocasionado pelo material utilizado não oferecer resistência para suportar os esforços de corte da ferramenta ou erro de medição.

Mas de qualquer forma, os valores encontrados mostraram que os cantos ficaram realmente afiados, e este é um importante aspecto em relação à geometria do furo quadrado, a obtenção de cantos vivos ( $90^\circ$ ) nos cantos do quadrado, com valores muito baixos, isso quer dizer que quantos mais pontos coordenados forem programados, melhor será a trajetória da ferramenta, e conseqüentemente melhor a geometria obtida.

## **5.2 Problema de Aplicação**

Durante a usinagem, frequentemente depara-se com o desgaste das ferramentas que se está utilizando. O nível de desgaste muitas vezes ainda não requer a troca imediata da ferramenta, porém se faz necessário fazer correções, através dos corretores das máquinas, para que as peças não fiquem fora de conformidade.

Pode ser também que a ferramenta utilizada já venha de fábrica com uma medida inferior ou superior àquela que foi adquirida, às vezes são questões de milésimos, centésimos, mas que dependendo da precisão da usinagem, podem causar um grande problema na hora de conferir as medidas.

Como já foi descrito anteriormente, foram feitos 4 furos com uma ferramenta de medida menor à medida programada na máquina, a ideia é exatamente provocar o erro e a partir daí fazer a correção no programa.

Mas para fazer a correção no programa é necessário o operador medir o furo obtido e notar a inconformidade. A figura 5.7 traz a ilustração dos furos usinados, ampliados no projetor de perfil.

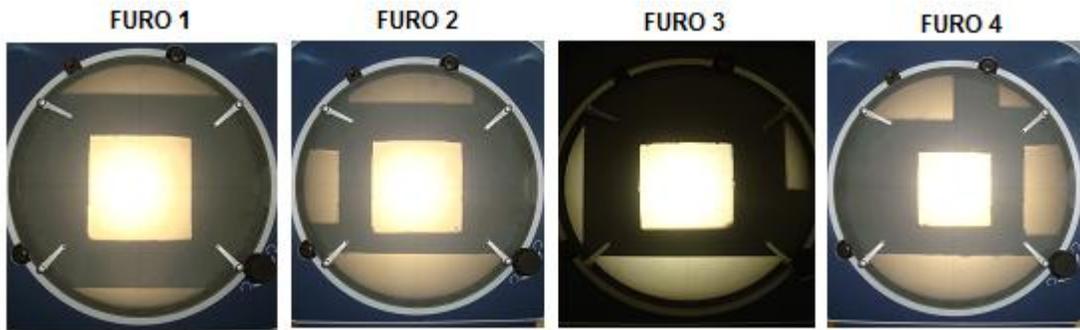


Figura. 5.7 - Furos fora das dimensões desejadas.

Após a usinagem foram feitas as medições, e com os valores obtidos na tabela 5.2, pode-se aplicar um método matemático simples para encontrar a medida da ferramenta, e posteriormente realizar a correção no programa.

Tabela 5.2 – Valores obtidos nas medições dos furos.

FURO	MEDIDA DO QUADRADO
1	9,67 mm
2	9,17 mm
3	9,33 mm
4	8,34 mm

De posse dos valores obtidos com as medições, para encontrar a medida da ferramenta utilizada no eixo-árvore, primeiro precisa subtrair a medida que se deseja usinar o furo quadrado da medida obtida na medição após a usinagem.

Onde:

D – Medida do Furo quadrado que se deseja obter.

Mq – Medida do furo após usinagem.

$$D - Mq$$

Com o resultado da subtração, retira-se a parte inteira e soma o resto com a medida obtida na usinagem do quadrado.

**Exemplo: Furo 1.**

$$12 - 9.67 = 2.33$$

Retirando a parte inteira, sobram 0.33, este valor agora é somado com a medida do furo obtido, ou seja:

$$9.67 + 0.33 = 10 \text{ mm}$$

Portanto a ferramenta utilizada no eixo-árvore foi de 10 mm.

Quando a diferença entre a medida que se deseja usinar o furo quadrado e a medida obtida após a usinagem do furo for superior a 10 mm, deve-se proceder da seguinte forma.

**Exemplo: Furo 4**

$$20 - 8.34 = 11.66$$

Retirando a parte inteira e somando o que sobra com mais 1, sobram 1.66, este valor agora é somado com a medida do furo obtido, ou seja:

$$8.34 + 1.66 = 10 \text{ mm}$$

Portanto a ferramenta utilizada no eixo-árvore foi de 10 mm.

## **6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS**

### **6.1 Geometria**

A partir dos resultados obtidos, é possível dizer que o trabalho cumpriu com os objetivos propostos na execução dos experimentos. Os furos executados com trajetória de translação composta por 120 pontos apresentaram uma excelente geometria e dimensão, comprovando que ao aumentar a quantidade de pontos, obtém-se um furo quadrado de qualidade.

### **6.2 Modelagem Matemática**

Observou-se também, que em comparação ao processo de obtenção do furo quadrado já existente, notou-se uma evolução no processo tornando-o mais inovador ainda, pois foi possível obter cantos afiados.

Isso mostra que, com a nova modelagem matemática é possível obter cantos afiados e produzir furos de qualquer medida com uma única ferramenta menor que a medida dos quadrados. Assim, o processo torna-se ainda mais flexível, podendo substituir outros processos de fabricação já utilizados com grande rendimento.

### **6.3 Aplicação**

Os experimentos de aplicação prática demonstraram ser possível realizar correções no programa, apenas com a medição do furo quadrado obtido fora de conformidade. Desta forma,

espera-se que no futuro seja possível utilizar as informações aqui demonstradas para tornar o processo para furos poligonais disponível em máquinas CNC.

Portanto com o aumento da facilidade que este processo pode oferecer para as empresas manufactureiras de produtos mecânicos e outras, pode-se reduzir o tempo de setup das máquinas e torna o processo ainda mais produtivo.

#### **6.4 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Pode-se sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- Fazer estudos para utilização de outros comandos CNC para usinagem do furo quadrado e outros polígonos.
- Desenvolvimento do processo para diversos tipos de polígonos: pentágonos, sextavados, etc.
- Desenvolvimento de comandos para furação poligonal com movimento principal sincronizado em softwares CAM.
- Desenvolvimento de ciclos pré – configurados no comando CNC para fácil utilização pelo usuário final.
- Usinagem de cavidades de matrizes com um ou mais cantos afiados.
- Usinagem de diversos tipos de polígonos com uma única ferramenta.
- Desenvolvimento de ferramenta para fazer a furação em Aço.

## REFERÊNCIAS

ARANTES, L. J. **Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**. Uberlândia, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia.

BARROS, Antônio César da Costa. **O Uso da Computação Gráfica no Ensino de Curvas de Largura Constante, Lugares Geométricos e Envolventes**. In: BIENAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA. Belo Horizonte, 14 a 18 de outubro de 2002.

BARTHOLOMÄUS, Rudolf, Berlin, Germany. **Tool for Drilling Polygonal Holes**. United States Patent Office. Patented 1,992,346, February 26, 1935.

BATISTA, Marcelo Ferreira. **Curso Técnico em Mecatrônica: Processos de Usinagem**. SENAI –SP, São Paulo, 2003. (Apostila).

CASTRO, Marcelo Hirai, **Processo para Obtenção de Furos Quadrados Utilizando Máquinas Ferramentas CNC com Ferramenta em Rotação**, Campinas, 2012, 111p. Dissertação (Mestrado).

COX, Barry James; WAGON, Stan. Drilling for polygons. **American Mathematical Monthly**, v. 119, n. 4, p. 300-312, 2012.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. 2010, **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 7. ed. Artiliber.

DISPOSITIVO PARA FUROS POLIGONAIS NO TORNO MECÂNICO. Drilling Square Holes, Scott Smith. Disponível em: <http://www.mikesenese.com/DOIT/2011/10/drilling-square-holes-with-a-reuleaux-triangle>. Acesso em: 13/12/2013.

DOYLE, Lawrence. **Processos de Fabricação e Materiais para Engenheiros**. São Paulo, Editora Edgar Blucher LTDA, Copyright 1962, Printice Hall.

FERRARESI, Dino. **Usinagem dos Metais**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1973.

FERRAMENTAS PARA FUROS POLIGONAIS. Drill Service. Disponível em: <http://www.drill-service.co.uk/Tools.asp>. Acesso em: 13/12/2013.

FUNAKI, Takahiro; HAYASHI, Tomoo of Japan. **Corner Cutting Method and NC Controller**. United States Patent Office. Patented US20020071732, Jun. 13, 2002.

GARDNER, Martin. **Curves of Constant Width, One of Which Makes it Possible to Drill Square Holes.** In Scientific American, Feb., 1963: 148-156.

HARRASER, Paul of Germany. **Apparatus for Drilling Polygonal Holes, Especially for Wood.** Patented DE540943 C , Dec. 31,1931.

HARRIS, Richard Henry. **Improvements in or Relating to Drilling Appliances.** Haseltine, Lake &Co.,28 Southampton Building, London, England and 55, Liberty Street, New York City, USA., Patented 102,874, September 14, 1916.

HUTTON, David Brown; DANIELS, Archibald Frederick George. **Drill for Drilling Square Holes.** United States Patent Office, No 456,258, Patented July 21,1891.

KATOH, Kouichi. et al, of Japan. **Method and Tool for Cutting Inside Corner.** United States Patent Office. Patented US6601484, Jun. 21, 2003.

LAUREANO, Ivan Aparecido; GASPAN, Carlos; POLITO, Celso di; SCARAMBONI, Antonio. **Universo da Mecânica.** 1ª Ed., FRM, São Paulo, 2009. 180p.

LEÃO, F. N. ; PASHBY, I. R. **A Review on the Use Environmentally-Friendly Dielectric Fluids in Electrical Discharge Machining.** Journal of materials Processing Technology. V 149, p. 341-346, 2004.

LIMA, F. E. **Rugosidade e Integridade Superficial do Aço-Rápido ABNT M2 após Usinagem por Descargas Elétricas.** Uberlândia, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia.

MÁQUINAS DE CORTE A LASER COM COMANDO CNC. Yasini Máquinas e Equipamentos. Disponível em: <http://portuguese.powerpress-machine.com/sale-889558-cnc-laser-cutting-machine-for-sheet-metal-3000mm-1500mm-to-cut-acrylic-rubber-marble.html>. Acesso em: 24/01/2014.

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO: CORTE COM JATO DE ÁGUA. Empresa LGV. Disponível em: <http://www.cortejatoagua.com.br/>. Acesso em: 23/01/2014.

Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do SENAI-SP. ISSN: 1981-8270. v.6, n.11, mar. 2012.

SANDVIK, **Manual Técnico de Usinagem**, 2013, Uma publicação da Sandvik Coromant.

SECCO, Adriano Ruiz. **Telecurso: profissionalizante de Mecânica: processos de fabricação.** Ampliação e revisão de conteúdo Jorge Antônio Giles Ferrer. v.4. Rio de Janeiro; [s.n.], 2009. 192p.

SMITH, Scott. **Drilling Square Holes**. Published in The Mathematics Teacher, October 1993.

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de Corte II**. v.3 e 4, 1992.

WATTS, HARRY J. of Turtle Creek, Pennsylvania. **Floating Tool Chuck**. United States Patent Office. Patented 1,241,175, Sept. 25,1917.

WATTS, HARRY J. of Turtle Creek, Pennsylvania. **Drill or Boring Member**. States Patent Office. Patented 1,241,176, Sept. 25,1917.

WATTS, HARRY J. of Turtle Creek, Pennsylvania. **Floating Tool Chuck**. United States Patent Office. Patented 1,241,177, Sept. 25,1917.

WOLKERSTORFER, Charles of St. Paul Minnesota. **Drilling Device**. United States Patent Office. Patented 1,618,900, February 22, 1927.

ZIADA, Y. ; KOSHY, P. **Rotating Curvilinear Tools for EDM of Polygonal Shapes with Sharp Corners**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 56(1), 221-224, 2007

## ANEXO A

Exemplo: Pontos obtidos na planilha do EXCEL para serem programados no centro de usinagem.  
Ferramenta de 10 mm e Furo de 12 mm.

Quadrante 1				Quadrante 2			
a (°)	a (rad)	X (mm)	Y (mm)	a (°)	a (rad)	X (mm)	Y (mm)
0	0	3,113249	1,000000	90	1,570796	1,000000	-3,113249
3	0,05236	2,855525	1,109525	93	1,623156	1,109525	-2,855525
6	0,10472	2,606420	1,202212	96	1,675516	1,202212	-2,606420
9	0,15708	2,366617	1,277717	99	1,727876	1,277717	-2,366617
12	0,20944	2,136773	1,335742	102	1,780236	1,335742	-2,136773
15	0,261799	1,917517	1,376035	105	1,832596	1,376035	-1,917517
18	0,314159	1,709451	1,398394	108	1,884956	1,398394	-1,709451
21	0,366519	1,513146	1,402668	111	1,937315	1,402668	-1,513146
24	0,418879	1,329138	1,388754	114	1,989675	1,388754	-1,329138
27	0,471239	1,157933	1,356597	117	2,042035	1,356597	-1,157933
30	0,523599	1,000000	1,306195	120	2,094395	1,306195	-1,000000
33	0,575959	0,855771	1,237594	123	2,146755	1,237594	-0,855771
36	0,628319	0,725643	1,150892	126	2,199115	1,150892	-0,725643
39	0,680678	0,609971	1,046234	129	2,251475	1,046234	-0,609971
42	0,733038	0,509073	0,923816	132	2,303835	0,923816	-0,509073
45	0,785398	0,423225	0,783882	135	2,356194	0,783882	-0,423225
48	0,837758	0,352662	0,626725	138	2,408554	0,626725	-0,352662
51	0,890118	0,297579	0,452683	141	2,460914	0,452683	-0,297579
54	0,942478	0,258125	0,262142	144	2,513274	0,262142	-0,258125
57	0,994838	0,234410	0,055534	147	2,565634	0,055534	-0,234410
60	1,047198	0,226497	-0,166667	150	2,617994	-0,166667	-0,226497
63	1,099557	0,234410	-0,403943	153	2,670354	-0,403943	-0,234410
66	1,151917	0,258125	-0,655735	156	2,722714	-0,655735	-0,258125
69	1,204277	0,297579	-0,921444	159	2,775074	-0,921444	-0,297579
72	1,256637	0,352662	-1,200434	162	2,827433	-1,200434	-0,352662
75	1,308997	0,423225	-1,492031	165	2,879793	-1,492031	-0,423225
78	1,361357	0,509073	-1,795528	168	2,932153	-1,795528	-0,509073
81	1,413717	0,609971	-2,110183	171	2,984513	-2,110183	-0,609971
84	1,466077	0,725643	-2,435225	174	3,036873	-2,435225	-0,725643
87	1,518436	0,855771	-2,769856	177	3,089233	-2,769856	-0,855771
90	1,570796	1,000000	-3,113249	180	3,141593	-3,113249	-1,000000

Quadrante 3				Quadrante 4			
a (°)	a (rad)	X (mm)	Y (mm)	a (°)	a (rad)	X (mm)	Y (mm)
180	3,141593	-3,113249	-1,000000	270	4,712389	-1,000000	3,113249
183	3,193953	-2,855525	-1,1095248	273	4,764749	-1,109525	2,855525
186	3,246312	-2,606420	-1,2022124	276	4,817109	-1,202212	2,606420
189	3,298672	-2,366617	-1,2777174	279	4,869469	-1,277717	2,366617
192	3,351032	-2,136773	-1,3357416	282	4,921828	-1,335742	2,136773
195	3,403392	-1,917517	-1,3760345	285	4,974188	-1,376035	1,917517
198	3,455752	-1,709451	-1,3983943	288	5,026548	-1,398394	1,709451
201	3,508112	-1,513146	-1,4026684	291	5,078908	-1,402668	1,513146
204	3,560472	-1,329138	-1,3887536	294	5,131268	-1,388754	1,329138
207	3,612832	-1,157933	-1,3565968	297	5,183628	-1,356597	1,157933
210	3,665191	-1,000000	-1,3061948	300	5,235988	-1,306195	1,000000
213	3,717551	-0,855771	-1,2375942	303	5,288348	-1,237594	0,855771
216	3,769911	-0,725643	-1,1508918	306	5,340708	-1,150892	0,725643
219	3,822271	-0,609971	-1,0462339	309	5,393067	-1,046234	0,609971
222	3,874631	-0,509073	-0,923816	312	5,445427	-0,923816	0,509073
225	3,926991	-0,423225	-0,7838821	315	5,497787	-0,783882	0,423225
228	3,979351	-0,352662	-0,6267246	318	5,550147	-0,626725	0,352662
231	4,031711	-0,297579	-0,4526828	321	5,602507	-0,452683	0,297579
234	4,08407	-0,258125	-0,2621424	324	5,654867	-0,262142	0,258125
237	4,13643	-0,234410	-0,0555343	327	5,707227	-0,055534	0,234410
240	4,18879	-0,226497	0,1666667	330	5,759587	0,166667	0,226497
243	4,24115	-0,234410	0,4039427	333	5,811946	0,403943	0,234410
246	4,29351	-0,258125	0,6557349	336	5,864306	0,655735	0,258125
249	4,34587	-0,297579	0,9214444	339	5,916666	0,921444	0,297579
252	4,39823	-0,352662	1,2004344	342	5,969026	1,200434	0,352662
255	4,45059	-0,423225	1,4920314	345	6,021386	1,492031	0,423225
258	4,502949	-0,509073	1,7955276	348	6,073746	1,795528	0,509073
261	4,555309	-0,609971	2,1101826	351	6,126106	2,110183	0,609971
264	4,607669	-0,725643	2,4352251	354	6,178466	2,435225	0,725643
267	4,660029	-0,855771	2,7698558	357	6,230825	2,769856	0,855771
270	4,712389	-1,000000	3,1132487	360	6,283185	3,113249	1,000000