

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**DAYOUB MOUSSA DAYOUB NETO
PEDRO HENRIQUE FERREIRA BUZZATTO
RICARDO CAVALCANTI REBELLO**

**SUBSTITUIÇÃO DE UM PROCESSO DE REBARBAÇÃO MANUAL
POR UM PROCESSO DE REBARBAÇÃO ELETROQUÍMICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2011

**DAYOUB MOUSSA DAYOUB NETO
PEDRO HENRIQUE FERREIRA BUZZATTO
RICARDO CAVALCANTI REBELLO**

**SUBSTITUIÇÃO DE UM PROCESSO DE REBARBAÇÃO MANUAL
POR UM PROCESSO DE REBARBAÇÃO ELETROQUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do curso superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial dos Departamentos Acadêmicos de Eletrônica-DAELN e de Mecânica-DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial.

Orientador: Prof. Eng. Pedro Luiz Fiad do Amaral

CURITIBA

2011

DAYOUB MOUSSA DAYOUB NETO
PEDRO HENRIQUE FERREIRA BUZZATTO
RICARDO REBELLO CAVALCANTI

SUBSTITUIÇÃO DE UM PROCESSO DE REBARBAÇÃO MANUAL POR UM PROCESSO DE REBARBAÇÃO ELETROQUÍMICA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 06 de Dezembro de 2011, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os alunos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado

Prof. Milton Luiz Poli
Coordenador de Curso
Departamento Acadêmico de Mecânica

Prof. Décio Estevão do Nascimento
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso
Departamento Acadêmico de Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Pedro Luiz Fiad do Amaral, Eng. Mec.
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Aloísio José Schuitek,
DAMEC, UTFPR

Prof. Ubiradir Mendes Pinto,
DAELN, UTFPR

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às nossas famílias por nos ter dado condições de chegarmos até aqui;

Aos Departamentos de Mecânica e Eletrônica da UTFPR pela disponibilização de equipamentos;

Ao Prof. Pedro Luiz Fiad do Amaral por todas as orientações e recomendações durante o projeto, e por nos ter aceito como orientados.

RESUMO

FERREIRA BUZZATTO, Pedro Henrique; MOUSSA DAYOUB NETO, Dayoub; REBELLO CAVALCANTI, Ricardo. **Substituição de um Processo de Rebarbação Manual por um Processo de Rebarbação Eletroquímica**. 2011. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Mecatrônica Industrial) - Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

A altíssima competitividade do mercado automotivo atual obriga as empresas a buscar a melhoria contínua em seus processos através da implementação de conceitos de “*Lean Manufacturing*”. O ganho em produtividade significa melhorar de forma direta a competitividade, além da produtividade fatores como robustez dos processos e satisfação dos colaboradores também tem grande influencia nos resultados atingidos. O objetivo do estudo apresentado é demonstrar a viabilidade de substituição de um processo de rebarbação manual de peça usinada por um processo de rebarbação eletroquímica (ECM – *Eletrochemical Machining*) de uma peça metálica usinada, de uma empresa multinacional do ramo automobilístico. A manufatura moderna busca aliar a tecnologia de ponta com a produtividade, desta forma a busca por novos processos e tecnologias mais eficientes torna-se cada vez mais importante no âmbito industrial, o projeto em questão foi desenvolvido com o objetivo de substituir o processo de rebarbação manual por um processo de rebarbação eletroquímica, tal processo de fabricação utiliza-se da remoção eletroquímica para remover rebarbas e micro rebarbas que outros processos de usinagem convencionais não seriam capazes de remover. Devido à complexidade do processo ECM a implementação deste projeto tornou-se bastante trabalhosa e exigiu o estudo de diversos aspectos envolvidos como: mecanismos de formação de rebarbas em operações de usinagem, usinagem eletroquímica, limitações do equipamento utilizado, desenvolvimento de novo ferramental, desenvolvimento de novo software e hardware para controle do processo, limitações do projeto do produto a ser usinado, equipamentos de inspeção para o novo processo e critérios de aprovação dos clientes para a substituição do processo em questão, através do sucesso de todos os fatores do projeto foi possível aumentar a produtividade da linha de produção, melhorar as condições de trabalho dos colaboradores, aumentar robustez do processo e reduzir possibilidade de danificações na peça produzida.

Palavras-Chaves: Rebarbação, Usinagem e ECM (Usinagem Eletroquímica).

ABSTRACT

FERREIRA BUZZATTO, Pedro Henrique; MOUSSA DAYOUB NETO, Dayoub; REBELLO CAVALCANTI, Ricardo. **Replacing a Manual Deburring Process for an Electrochemical Machining Process**. 2011. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Mecatrônica Industrial) - Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

The high competitiveness of today's automotive market forces companies to seek continuous improvements on its processes through the implementation of "Lean Manufacturing" concepts. The gain in productivity leads to a direct increase on the competitiveness, besides the productivity factors such as robustness of the processes and employee satisfaction also has great influence on the results achieved. The objective of this work is argue the feasibility to replacement of a manual deburring process through a process of electrochemical deburring (ECM - Eletrochemical Machining) of a machined metal part of a multinational company in the automotive sector. The modern manufacture try to put together the high technology with the productivity, in this way the search for new processes and more efficient technologies become more important on the industrial activity, the presented project was developed focused in the replacement of a manual deburring process by a Electrochemical machining operation, the ECM process uses the electrochemical removal to remove burrs and micro burrs that another conventional machining processes aren't able to remove. Due to the complexity of the ECM process the implementation of the presented project became complex and demanded the study of many process characteristic's as: burrs generation mechanisms on machining processes, electrochemical machining, limitations of the equipment used, new tooling, new hardware/software to control the process, limitations of the product machined, measurement and inspection equipment analysis and customer approval criterion to the replacement of the manual process, through the success of all project factors was possible increase the productivity on the production line, improve the work conditions of the associates, increase the robustness of the process and reduce the possibility of damage on the product manufactured.

Keywords: Deburring, Machining, ECM (Eletrochemical Machining)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos Processos de Fabricação	16
Figura 2 – Processos Não-Convencionais	19
Figura 3 - Definição de Rebarba conforme norma DIN 6784	23
Figura 4 - Exemplos da Definição de Rebarba de Gillespie (1996).....	24
Figura 5 - Variáveis da Rebarba.....	24
Figura 6 – Definição da geometria da rebarba	25
Figura 7 – Formação da rebarba de Poisson	26
Figura 8 – Rebarba de Poisson.....	27
Figura 9 – Rebarba de Encurvamento	28
Figura 10- Lascamento de Bordas ou “Breakout”.....	28
Figura 11 – Rebarba de Estiramento	29
Figura 12 - Rebarba por Interrupção de Corte	30
Figura 13 – Rebarbas Formadas durante Processo de Furação. À esquerda são rebarbas uniformes com capa e a direita é chamada de rebarba de coroa.	30
Figura 14 – Bombas Kennametal.....	32
Figura 15 – Exemplos de peças usinadas por ECM.....	33
Figura 16 – Conexão Roscada.....	33
Figura 17 – Classificação dos Processos de Remoção	35
Figura 18 - Representação esquemática das aplicações da ECM.....	36
Figura 19 – Subdivisão dos processos de Eletroerosão	37
Figura 20 – Demonstração da Rebarbação Eletroquímica.....	38
Figura 21 - Esquemático do equipamento ECM.....	39
Figura 22 – Princípio do Processo Eletrolítico.....	41
Figura 23 – Representação da Amostra.....	43
Figura 24 – Microestrutura da seção transversal da superfície temperada e revenida do aço SAE 4144	43
Figura 25 - Macro dureza HRC	44
Figura 26 – Perfil de dureza das Amostras	45
Figura 27 – Ensaio de Tração do Material Sem Tratamento e Com Tratamento	46
Figura 28 – Fotos do Processo de Rebarbação Manual	47
Figura 29 – Área de Rebarbação (encontro entre furo e rasgo de chaveta)	48
Figura 30 - Válvula para controle de pressão do Eletrólito.....	49
Figura 31 - Área de Rebarbação	52
Figura 32 – Representação da ferramenta (eletrodo + máscara).....	53
Figura 33 - Peça em Corte da Peça Usinada por Rebarbação Eletroquímica	54
Figura 34 – Endoscópio	55
Figura 35 – Perfilômetro.....	56
Figura 36 – Fluxo do Processo com Rebarbação Manual.....	57
Figura 37 – Fluxo do Processo com Rebarbação Eletroquímica.....	58
Figura 38 – Rebarbas encontradas no processo.....	60
Figura 39 – Peças após processo ECM.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Composição Aço SAE 4144	42
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTO	12
1.2	PROBLEMA	13
1.3	JUSTIFICATIVA	13
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	Objetivos Gerais	14
1.4.2	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	FABRICAÇÃO	15
2.2	USINAGEM	16
2.2.1	Processos Convencionais	17
2.2.2	Processos Não-Convencionais	18
2.3	REBARBA	22
2.3.1	Definição	22
2.3.2	Geometria da Rebarba	24
2.3.3	Mecanismo de Formação da Rebarba	25
2.3.4	Rebarbação	31
2.3.5	Presença de Rebarbas nos Processos de Fabricação	32
2.4	USINAGEM ELETROQUÍMICA (ECM – ELETROCHEMICAL MACHINING)	34
2.4.1	Rebarbação Eletroquímica	36
2.4.2	Reação Química e Parâmetros do Processo	38
2.4.3	Vantagens e Limites do Processo ECM	41
3	TESTES E ENSAIOS	42
3.1	MATERIAIS	42
3.1.1	Microestrutura, Dureza e Ensaio de Risco do Aço SAE 4144	43
4	METODOLOGIA	47
4.1	ASPECTOS DO PROCESSO	48
4.1.1	Capacidade do gerador de corrente da máquina	48
4.1.2	Vazão e pressão de eletrólito	48
4.1.3	Tempo de ciclo requerido	49
4.1.4	Custo das ferramentas em comparação com o processo atual	49
4.2	ALTERAÇÃO DO PROJETO DO PRODUTO	51
4.2.1	Diâmetro do Eletrodo	51
4.2.2	Distância Entre a Peça e o Eletrodo	51

4.2.3	Área exposta do eletrodo.....	52
4.2.4	Máscara.....	52
4.2.5	Definição do Processo.....	52
5	DISCUSSÕES.....	54
5.1	INSTRUMENTOS DE INSPEÇÃO E EXAME UTILIZADOS.....	55
5.1.1	Endoscópio.....	55
5.1.2	Perfilômetro.....	56
5.2	FLUXO DO PROCESSO.....	57
6	RESULTADOS.....	59
7	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A Produção Enxuta é um termo criado por James Womack e Daniel Jones para designar a filosofia de negócios oriunda do Sistema Toyota de Produção, que visa à eliminação de desperdícios e constante aprimoramento na agregação de valor para o cliente (WOMACK et al., 1991).

Essa filosofia se iniciou no Japão após a 2ª guerra mundial, pois como não havia recursos materiais, mercado interno ou logística internacional, o desperdício poderia significar a diferença entre a vida e a morte das pessoas e empresas. Então, contrariando grandes corporações americanas da época que adotavam o modelo de produção em massa, os japoneses buscaram na sua histórica simplicidade a inspiração para evoluir sem desperdício. Ao longo das décadas seguintes foi consolidada uma significativa mudança no modo de empreender. A filosofia “*lean*”, a qual foi sendo assimilada por outras montadoras, seus fornecedores e por empresas de outros ramos (WOMACK et al., 1991).

Atualmente as empresas do ramo metal-mecânico buscam aplicar os conceitos do *Lean manufacturing* para identificação e eliminação dos desperdícios de fabricação e otimização dos resultados. Com esta abordagem o tema deste trabalho busca implementar melhorias na linha de produção com forte impacto em produtividade, qualidade do produto e melhoria significativa nas condições de trabalho dos colaboradores que atuam neste processo.

O tema deste trabalho é a substituição das operações de rebarbação manual de uma peça metálica, de uma empresa multinacional do ramo automotivo pesado, por um processo de rebarbação e usinagem eletroquímica conhecido como ECM (*Eletrochemical Machining*), processo este de alta tecnologia e sofisticação, com poucas empresas que detêm *know-how* no mercado atualmente.

1.2 PROBLEMA

Atualmente o processo de rebarbação do produto é realizado de forma manual, desta forma o processo possui diversas limitações técnicas. Entre os principais problemas a serem solucionados tem-se a ergonomia da operação, pois o processo é realizado manualmente pelo colaborador. Isto pode gerar diversos problemas para o produto incluindo problemas com qualidade, processo instável devido à influência humana. Em alguns casos pode haver a não realização da operação dentro do fluxo produtivo, rebarbas na peça após o processo manual, problemas de tempo de ciclo da linha, pois em casos de operador inexperiente esta operação pode tornar-se o gargalo da linha de produção, e durante a operação manual o operador pode danificar a peça com a ferramenta pneumática de rebarbação ou gerar batidas na peça contra outros dispositivos de manufatura.

Além dos problemas descritos acima, atualmente existem limitações técnicas em processos de usinagem anteriores à operação de rebarbação manual, desta forma será necessário alterar diversos parâmetros de usinagem como avanços e velocidade de corte para evitar a geração de rebarbas que não sejam possíveis de remover manualmente, neste contexto o custo de ferramentas aumenta (parâmetros de usinagem não ideais para ferramentas de usinagem de altíssima performance. A produtividade da linha também é afetada por operações manuais.

Para algumas operações específicas o processo de usinagem eletroquímica é uma das poucas opções, como por exemplo a rebarbação de intersecção de furos.

Com a implementação da proposta será possível aumentar a produtividade da linha, e não haverá a necessidade de um colaborador exclusivo dedicado à operação de rebarbação manual.

1.3 JUSTIFICATIVA

A automatização do processo de rebarbação manual descrito na problemática acima tem como principal objetivo implementar os conceitos de melhoria contínua, conseqüentemente elevando a performance do processo e melhorando as condições de trabalho dos operadores.

O desenvolvimento deste projeto foi iniciado com a identificação dos efeitos colaterais gerados pelo processo manual. A operação manual de rebarbação gera problemas em relação a estabilidade do processo, pois depende da habilidade manual do operador, condição de desgaste da ferramenta utilizada, nível de rebarba de cada peça antes da realização da operação, entre outros fatores.

Além da qualidade da peça a ergonomia também é um problema da operação manual, pois exige a necessidade de realizar esforço repetitivo com alta frequência.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos Gerais

Demonstrar a viabilidade de substituição de um processo de rebarbação manual por um processo de rebarbação eletroquímica de uma peça metálica usinada.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar os aspectos do processo ECM
- Verificar se o processo ECM é eficaz na região da peça à ser usinada
- Verificar a alteração do projeto do produto
- Identificar as melhorias na qualidade da operação

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FABRICAÇÃO

O ato de construir ou fabricar, do latim “Construere” (Com “Junto” e Struere “empilhar”), é basicamente transformar um material bruto (matéria-prima) em um produto acabado.

O conceito de fabricar vem sendo utilizado desde a pré-história, quando o homem sentiu a necessidade de ferramentas para caçar e se defender, afinal de contas apenas os seus membros não conseguiriam dar conta de todas as atividades necessárias para sobreviver na época. Aos poucos percebia que a utilização de materiais, como por exemplo a pedra, poderia ser bem mais efetiva para se defender de um predador do que apenas seu punho. Posteriormente percebeu que afiando o material poderia cortar a caça e raspar a pele dos animais. Foi dessa forma que a fabricação foi evoluindo, conforme o tempo ia passando e as necessidades aparecendo, as operações para fabricar componentes e ferramentas seguiam o mesmo ritmo. Durante um longo período a pedra foi utilizada como matéria prima, mas por volta de 4.000 a.c os metais começaram a surgir, primeiro com o cobre, depois com o bronze e a partir de 1.200 a.c com o Ferro (SOUZA, 2011, p. 4).

Atualmente os processos de fabricação dos materiais metálicos são inúmeros e variados. Como exemplos temos a fundição, a soldagem, a usinagem, a conformação e a metalurgia do pó, a fim de obter a peça desejada (FERRARESI, 1977).

Para definir o processo a ser utilizado, existem diversos fatores que devem ser considerados

- Características do material a ser usado
- Forma e dimensão da peça final
- Tolerâncias de forma e dimensão da peça
- Acabamento superficial
- Quantidade de peças para produção
- Custos envolvidos

Os processos de fabricação dos metais e suas ligas são divididos em processos com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco. A Figura 1 ilustra a classificação dos diversos processos de fabricação:

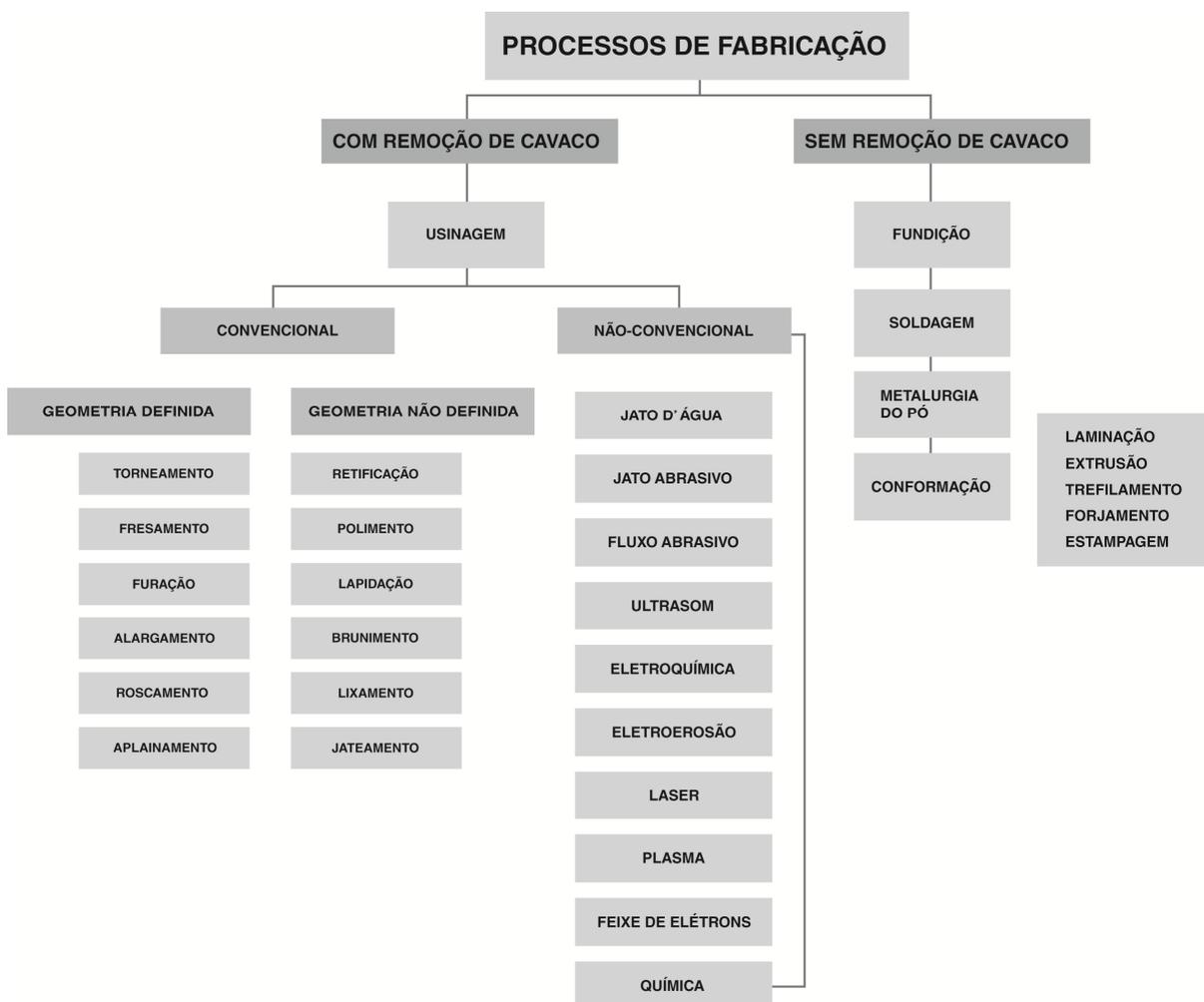


Figura 1 – Classificação dos Processos de Fabricação
 Fonte: Souza (2011).

2.2 USINAGEM

A usinagem é um processo de fabricação que envolve operações de corte geradas por uma ferramenta que remove excessos do material bruto até a obtenção da peça finalizada. Nas operações de corte o material retirado ganha uma forma específica conforme diversos parâmetros que envolvem o processo, essa sobra é chamada de cavaco. Para Ferraresi (1969) processo de usinagem é “aquele que, ao

conferir a peça, a forma, as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco”.

Podemos definir usinagem conforme a Figura 1, como sendo o processo de fabricação com remoção de cavaco. Para Ferraresi (1969) cavaco é “a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular”.

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo o mundo.

A classificação dos processos de usinagem segundo a norma DIN 8580 (2003) aplica-se aos processos em que haja remoção de cavaco, esses processos podem ser convencionais ou não convencionais.

2.2.1 Processos Convencionais

Os processos convencionais de usinagem aplicam-se nas operações que empregam energia mecânica na remoção do material, mais comumente por cisalhamento, no contato entre a ferramenta e a peça.

Existe uma subdivisão dentro da usinagem convencional que são os processos com ferramenta de geometria definida e ferramenta com geometria não-definida. Nas operações com ferramenta de geometria definida, as arestas cortantes da ferramenta possuem formato e tamanho conhecidos.

Nas operações com ferramenta de geometria não-definida, a remoção de material ocorre devido à ação de partículas abrasivas de alta dureza. Essas partículas podem atuar soltas, como no processo de lapidação, ou unidas como nos processos de retífica e brunimento (SOUZA, 2011, p. 8).

2.2.2 Processos Não-Convencionais

Os processos não-convencionais de usinagem ocupam atualmente um lugar de destaque no mercado de fabricação, podendo ser vantajoso e competitivo na solução de muitos problemas de engenharia mecânica.

O grande avanço tecnológico propiciado pelo desenvolvimento de novos métodos de usinagem, graças à aplicação prática de novos princípios introduzidos pela física, química e eletrônica, coloca ao alcance do profissional da área de tecnologia mecânica, diversos equipamentos que estão revolucionando a engenharia (MULLER; ARAÚJO, 1972).

Dentre os diversos métodos, se destacam as aplicações de laser, de plasma, ultra-som, eletroerosão, química e eletroquímica. Eles são classificados conforme as formas de energia empregadas para remoção do material: mecânica, eletroquímica, química e térmica, conforme descrito na norma DIN 8590 (2003).

Estas formas de energia estão descritas na Figura 2, pelo método da remoção do material, meio de remoção, fonte de energia e processo de remoção do material específico.

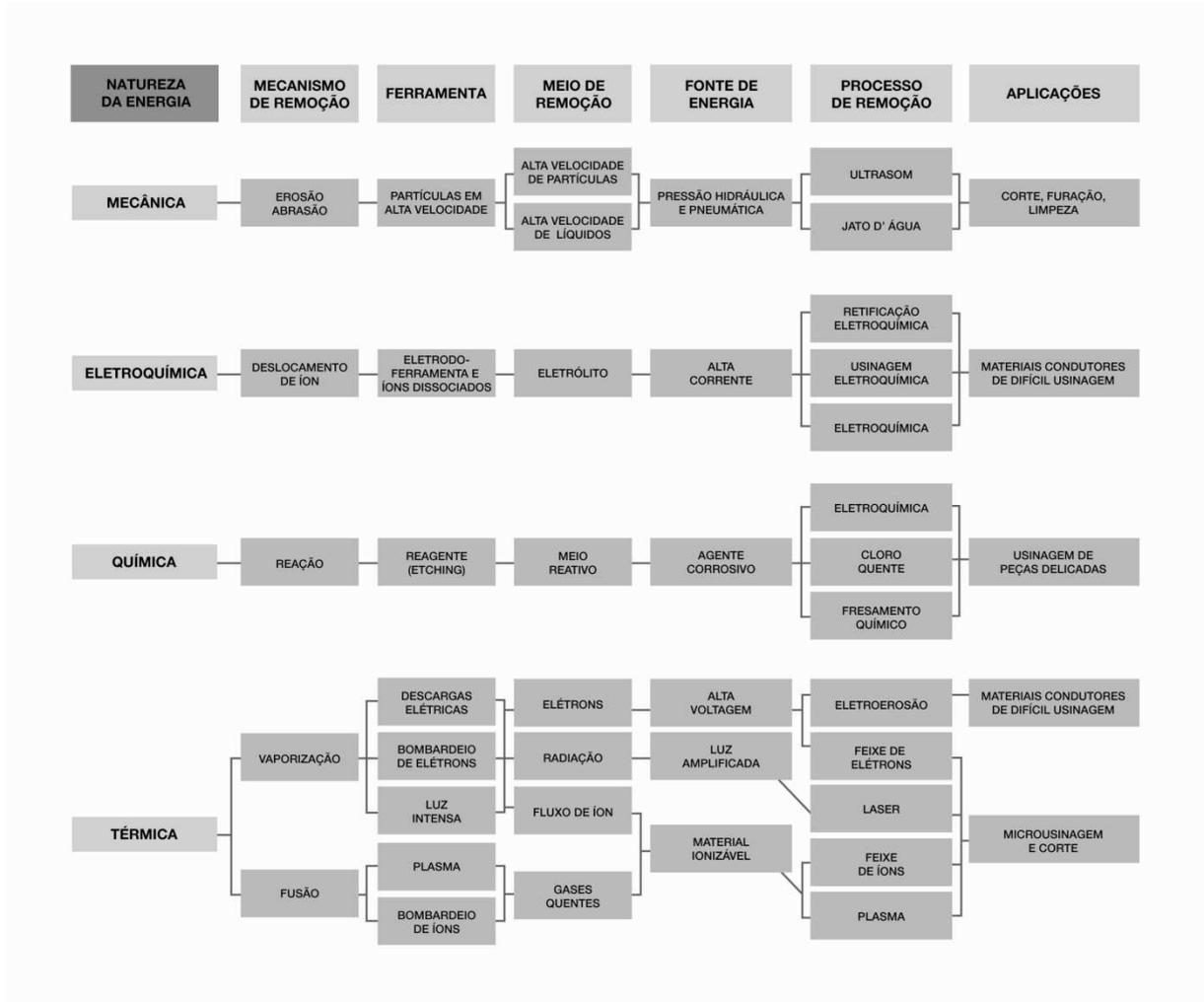


Figura 2 – Processos Não-Convencionais de Usinagem
Fonte: Benedict (1987)

Deve ser notado que enquanto os processos servem para um certo fim, sua classificação é arbitrária e bastante simplificada. A classificação demonstra que não existe processo de remoção que use apenas uma forma de energia.

Em alguns processos não convencionais a energia mecânica possui papel secundário, como por exemplo a circulação do eletrólito na usinagem eletroquímica.

Segue abaixo a descrição dos métodos de remoção de usinagem não convencional.

Remoção Mecânica

Quando trata-se em remoção por energia mecânica, em se tratando de processos não-convencionais a remoção é feita por erosão, sendo 2 processos de usinagem não-convencionais principais:

Jato d'água e ultra-sônico.

A usinagem por ultra-som é classificada como um processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não definida, dentro do subgrupo lapidação. Apesar de a remoção ser realizada pelo impacto de grãos abrasivos na superfície da peça de trabalho são as vibrações ultrasônicas que proporcionam o meio de remoção, gerando cavitações elevadas no sistema e dessa forma a remoção do material (KÖNIG, 2006). As principais literaturas do assunto tratam a usinagem por ultra-som como um processo de usinagem não-convencional.

A usinagem por jato d'água utiliza jatos de líquidos de alta velocidade e alta pressão, guiados através de pequenos orifícios para aplicação em cortes de materiais diversos (MULLER; ARAÚJO, 1972).

Remoção Eletroquímica

O grupo que utiliza energia eletroquímica representa um processo de usinagem não convencional chamado Usinagem Eletroquímica (*ECM-Electrochemical Machining*).

Trata-se de um processo específico de usinagem em metal a fim de atingir um contorno exigente da peça usinada. Além disso, retira as rebarbas resultantes dos processos de usinagem convencional (torneamento, fresamento, furação, etc.). Esse baseia-se no processo eletroquímico de dissolução anódica de material condutor elétrico (MULLER; ARAÚJO, 1972).

A usinagem eletroquímica é o assunto principal desse trabalho, o capítulo 2.4 é dedicado totalmente ao entendimento mais detalhado desse tema.

Remoção Química

Como o próprio nome diz é o grupo que utiliza energia química para remoção de material. Seus processos são baseados quase totalmente na ação química.

O processo mais importante deste grupo é a usinagem química. Ela é baseada no princípio da corrosão, utilizando um ou mais produtos químicos. Durante o processo ocorre uma reação química entre a peça e um agente, gerando dessa forma um produto de fácil remoção. Diferentemente da remoção eletroquímica no mínimo um dos reagentes são não-condutores de eletricidade (KÖNIG, 2006).

Remoção Térmica

O grupo de energia térmica representa em grupo de processos de usinagem não-convencional para remoção de material da peça de trabalho pela vaporização e fusão. Seus principais processos são: eletroerosão, feixe de elétrons, laser, plasma e feixe de íons.

A Eletroerosão é um processo em que a remoção do metal é feita através da vaporização da peça por faíscas elétricas de alta frequência. É muito utilizado na produção de furos e cavidades com alta precisão.

O princípio de usinagem por feixe de elétrons é a transformação de energia cinética de elétrons em alta velocidade em energia térmica quando colidem com a peça. O usinagem por laser é baseada similarmente na transformação da energia luminosa em energia térmica.

A usinagem por plasma e usinagem por feixe de elétrons utiliza em plasma ionizado para o transporte de energia (MULLER; ARAÚJO, 1972).

2.3 REBARBA

A maioria das operações de usinagem não deixa arestas lisas ou bem definidas. Em vez disso, as peças são muito susceptíveis em todo o contorno, exibindo irregularidades e projetando material endurecido ao longo das bordas, denominados rebarbas. Kim (2001) relatou vários problemas que afetam a forma e a função das peças na manufatura de processos devido à rebarbas.

A rebarba é formada devido a alguma deficiência do mecanismo de corte da ferramenta durante o processo de usinagem em geral, que se forma na superfície usinada, o que resulta em saliências de material para fora dos planos das superfícies de trabalho, distorcendo geometricamente e dimensionalmente a peça.

O conjunto e a operação de componentes usinados, em particular componentes de precisão, são afetados extremamente pela presença das rebarbas produzidas durante a usinagem (GILLESPIE, 2006).

2.3.1 Definição

Schäfer (1978) descreve a rebarba como “parte de uma peça, produzida por meio de um processo de fabricação, localizada em uma aresta ou uma superfície e que está fora da geometria desejada”. Ko e Dornfeld (1991) definiram como sendo uma “projeção indesejável de material, formado por consequência de uma deformação plástica que ocorreu durante uma operação de corte ou cisalhamento”. Já a norma DIN 6784 (1982) define rebarba como “uma saliência na aresta da peça fabricada”, conforme mostra a Figura 3. A definição de Schäfer engloba a rebarba nas arestas e também nas superfícies da peça de trabalho, que comumente são produzidas nos processos de fundição e solda, já a definição da norma DIN restringe às rebarbas apenas as arestas da peça.

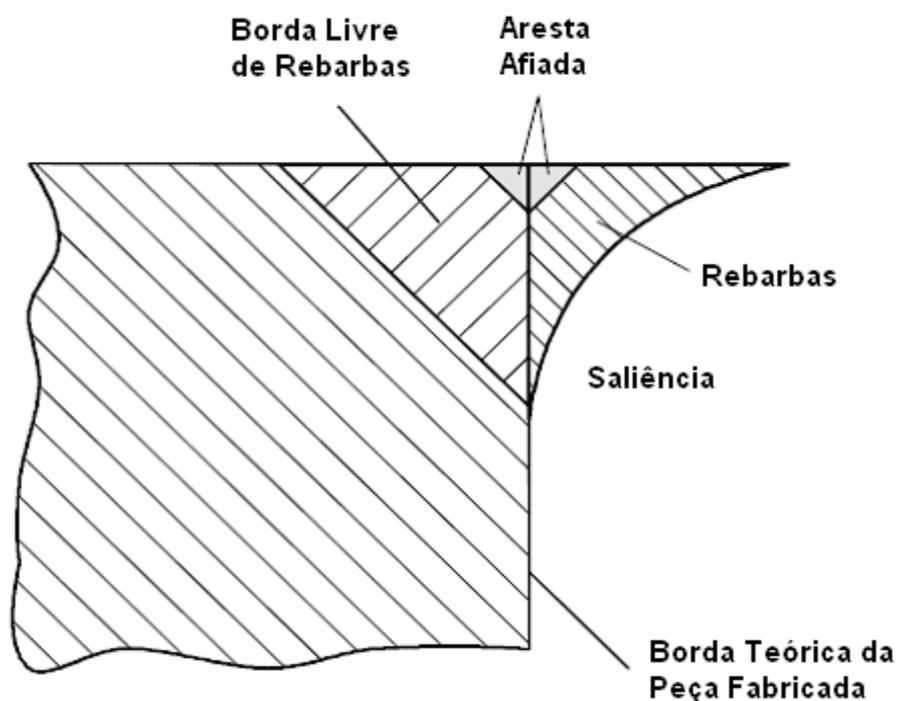


Figura 3 - Definição de Rebarba conforme norma DIN 6784
Fonte: Autoria própria.

Ao contrário das definições da norma DIN, Gillespie (1996) indica que a rebarba é limitada aos processos de corte e cisalhamento (Usinagem convencional). A rebarba produzida através dessas operações inclui toda a extensão do material após a intersecção teórica de duas superfícies que cercam a rebarba. Isso porque a referência, nesse caso, não é a superfície desejada, mas sim a intersecção teórica de duas superfícies da peça de trabalho. O que ele quer dizer é que a rebarba pode estar dentro da intersecção de dois planos da peça, conforme mostra a Figura 4:

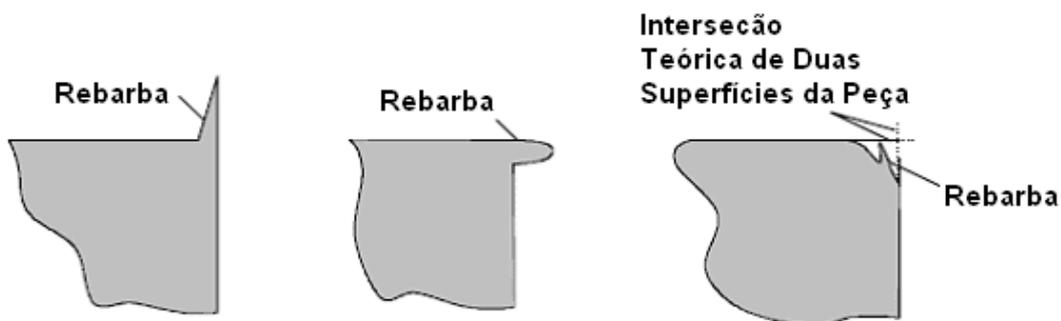


Figura 4 - Exemplos da Definição de Rebarba de Gillespie (1996)
Fonte: Gillespie (1996).

2.3.2 Geometria da Rebarba

A caracterização geométrica mais amplamente utilizada da rebarba foi proposta por Schäfer (1978). Ele afirmou que toda rebarba pode ser caracterizada pelo seu perfil longitudinal e transversal. O perfil longitudinal mostra a forma da rebarba ao longo da aresta e o perfil transversal descreve a forma perpendicular até a aresta. Enquanto a única medida na seção longitudinal é o comprimento da rebarba, as características mais importantes são definidas no perfil transversal.

A Figura 5 uma representação das dimensões essenciais para caracterização geométrica da rebarba:

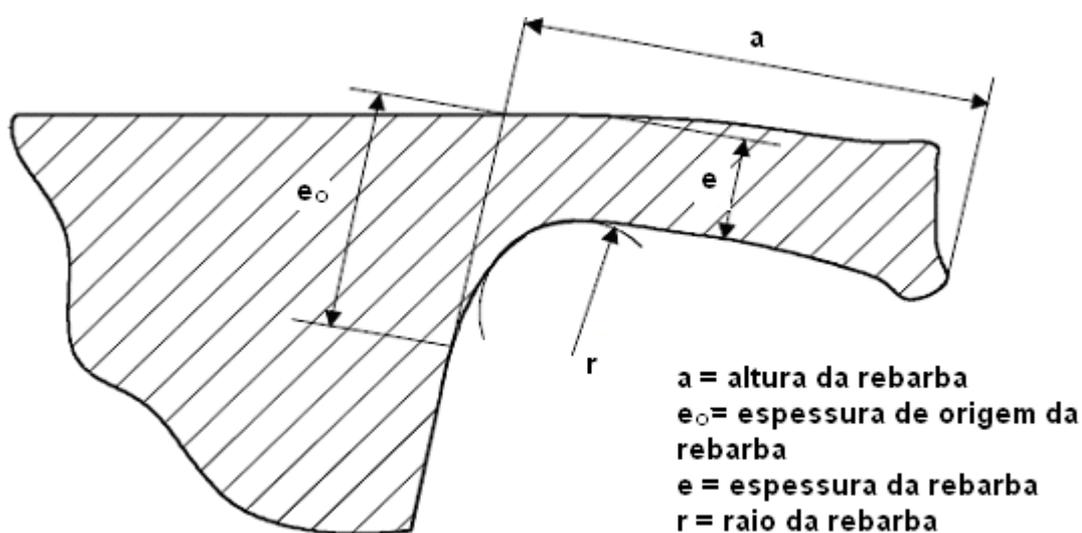


Figura 5 - Variáveis da Rebarba
Fonte: Schäfer (1978).

O perfil longitudinal da rebarba não é muito informativo já o comprimento da rebarba é de suma importância, pois descreve o quanto do total do comprimento da aresta será rebarbado, o que está relacionado diretamente com o custo da rebarbação. Isso possibilita calcular o tempo estimado e conseqüentemente o custo para rebarbar o elemento mecânico. Ainda assim é mais comum para se referir aos parâmetros da rebarba usar o perfil transversal. Link (1992) propôs uma medida chamada “*Gratwert*”, ou Valor da Rebarba, utilizando as variáveis definidas por Schäfer (1978). O “*Gratwert*” (“g”) nos fornece um senso de medida do esforço da rebarbação. Link (1992) definiu o “*Gratwert*” como:

$$g = \frac{4e_o + 2r + e + a}{8}$$

Para a norma DIN existe apenas um valor que define a geometria ideal da rebarba (Definida na figura 6 como valor “a”). Essa medida é tirada a partir da ponta da rebarba até a superfície perpendicular à aresta, conforme ilustrado na Figura 6:

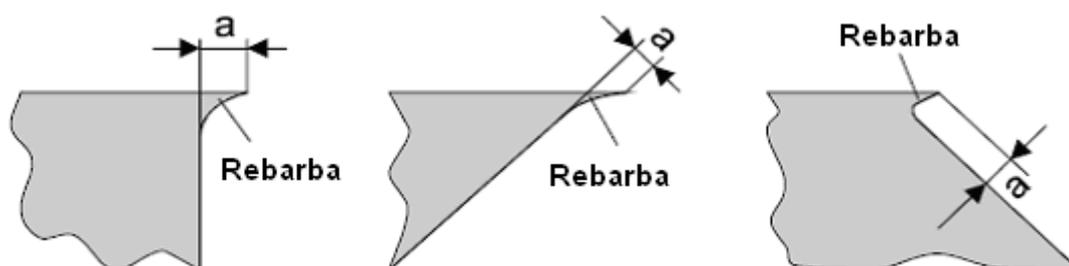


Figura 6 – Definição da geometria da rebarba
Fonte: DIN 6784 (1982).

2.3.3 Mecanismo de Formação da Rebarba

A análise teórica do mecanismo de formação de rebarba é uma tarefa extremamente complexa devido a fenômenos como a deformação plástica, que é dependente de diversos parâmetros do processo de fabricação (NAKAYAMA; ARAI, 1987). Suas classificações de rebarba são referentes às arestas principais e secundárias de corte.

O corte ortogonal simplifica as análises complexas dos mecanismos de formação de rebarbas, por isso é o mais utilizado. Ele reduz o número de variáveis

devido à sua simplicidade geométrica (HASHIMURA *et al.*, 1995). Ko e Dornfeld (1991) pesquisaram sobre mecanismos de formação de rebarbas no corte oblíquo e fizeram simplificações para utilizar a análise do corte do corte ortogonal.

Gillespie e Blotter (1976) realizaram uma nova pesquisa sobre a formação de rebarbas com a intenção de classificá-las e identificar os mecanismos de sua formação. Estudaram a influência dos parâmetros de corte, da geometria da ferramenta e desgaste nas propriedades das rebarbas. Constatou-se que as rebarbas no corte ortogonal são formadas por quatro mecanismos básicos, que serão discutidos a seguir.

A. Rebarba de Poisson

A rebarba de Poisson ocorre devido ao raio efetivo da aresta de corte da ferramenta e pelo grau de encruamento do material. Isso ocorre, pois essas arestas de corte não são perfeitamente afiadas, possuindo um raio de arredondamento, conforme ilustrado na Figura 7:

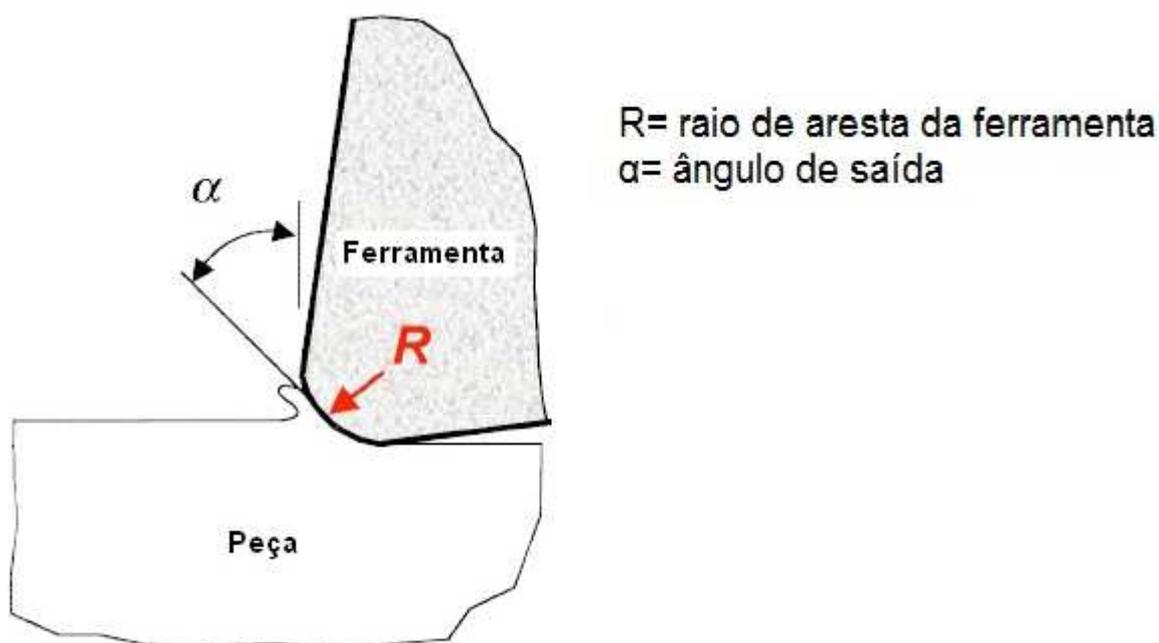


Figura 7 – Formação da rebarba de Poisson
Fonte: Lee (2001).

A rebarba de Poisson tem uma tendência ao abaulamento lateral, isso em se tratando de materiais dúcteis, quando o material sofre compressão, devido às altas pressões causadas pelo avanço da ferramenta, gerando dessa forma uma deformação plástica permanente, conforme ilustra a Figura 8:

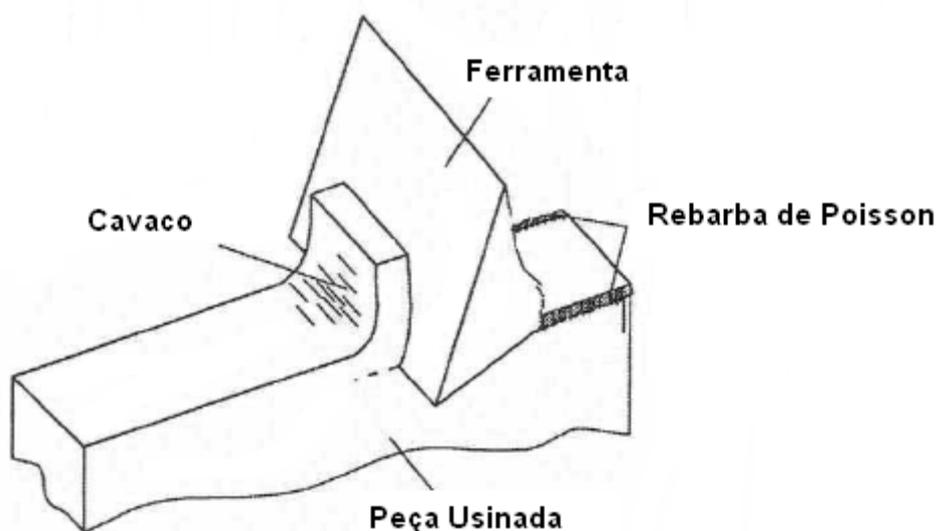


Figura 8 – Rebarba de Poisson
Fonte: Gillespie e Blotter (1976).

Rebarba de Encurvamento

A rebarba de encurvamento é basicamente uma lasca de material que é empurrada para fora da trajetória da aresta de corte ao invés de ser cortada. Quando trata-se de materiais dúcteis geralmente é uma rebarba longa formada no final do corte, dessa forma a rebarba fica localizada onde a força de corte é nula (GILLESPIE, 1973). É bem comum notarmos essa forma de rebarba em processos de fresamento de topo conforme Figura 9:

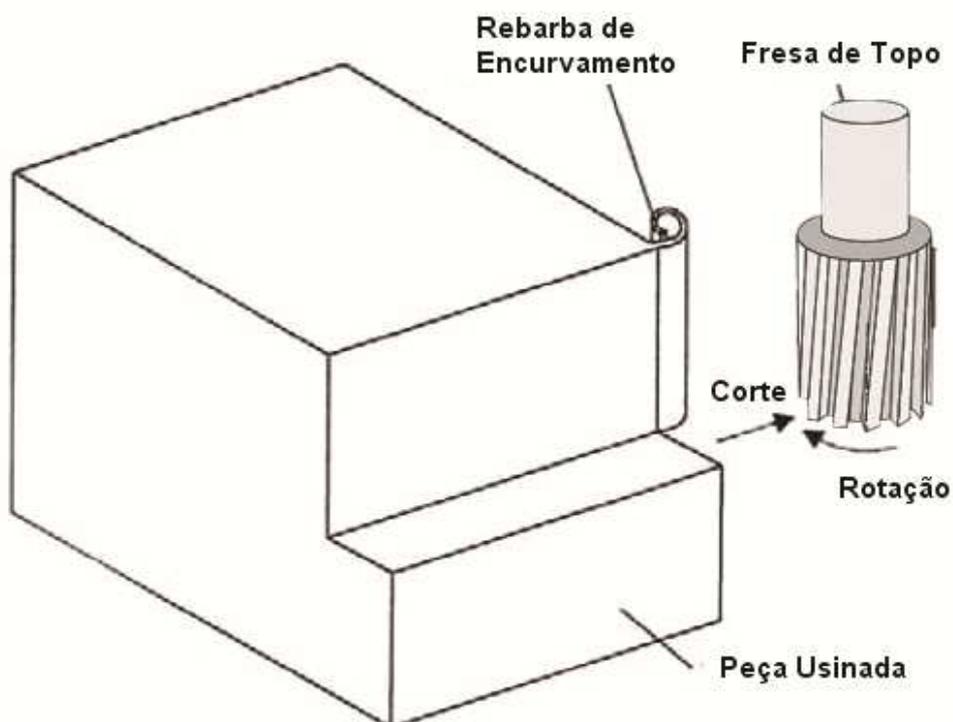


Figura 9 – Rebarba de Encurvamento
Fonte: Gillespie e Blotter (1976).

No caso de materiais frágeis, ocorre a tendência de fraturas antes que essa rebarba se complete, promovendo o lascamento de bordas ou “breakout” (KO; DORNFELD, 1991) conforme Figura 10:

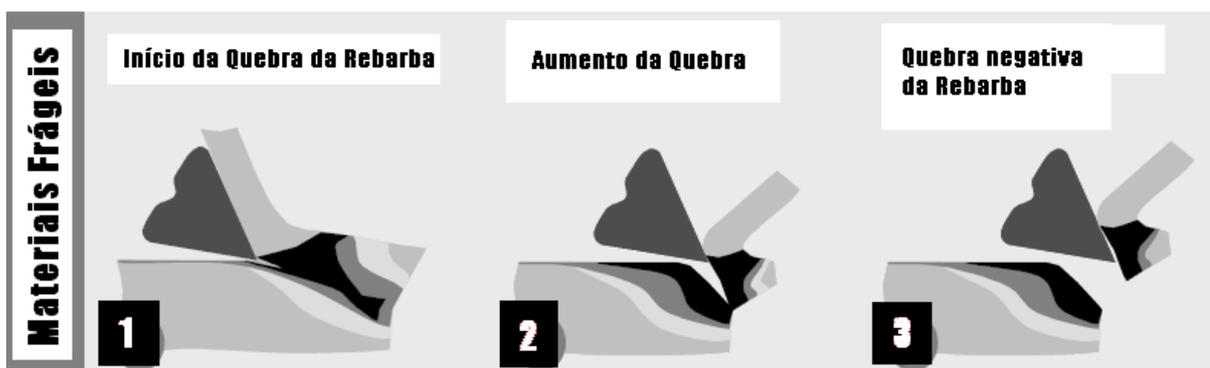


Figura 10- Lascamento de Bordas ou “Breakout”
Fonte: Hashimura et al. (1995).

Rebarba de Estiramento

A rebarba de estiramento é outro tipo de rebarba muito comum de encontrarmos nas peças usinadas por fresamento. É uma rebarba resultante da ação da ferramenta de corte, a qual provoca um efeito de cunha entre a superfície da peça e o cavaco, resultando no estiramento da peça, conforme ilustra a Figura 11:

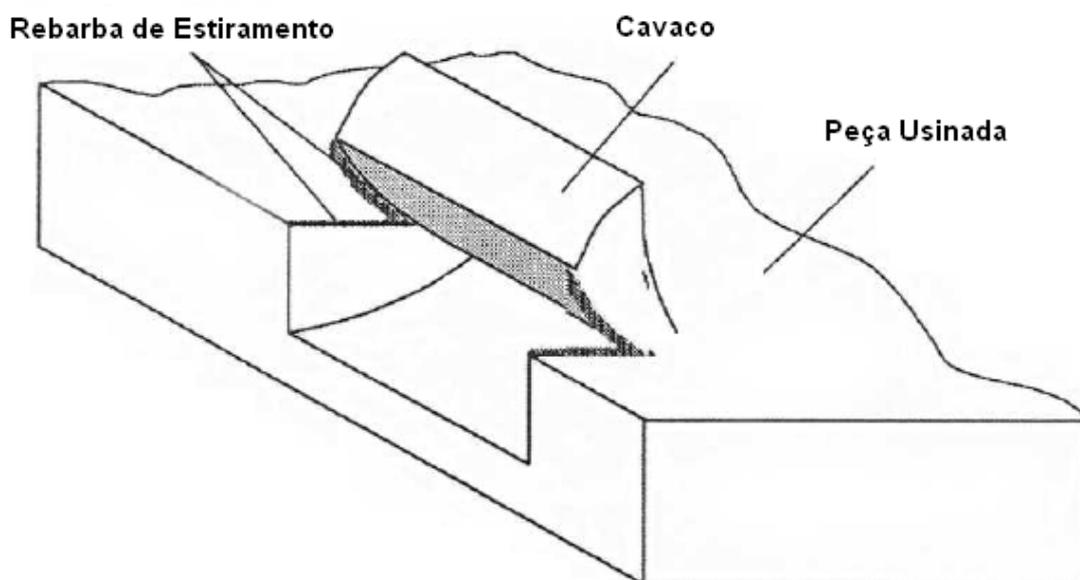


Figura 11 – Rebarba de Estiramento
Fonte: Gillespie & Blotter (1976).

Rebarba de Interrupção de Corte

A rebarba por interrupção de corte é um tipo de rebarba muito comum em processos de sangramento radial e serramento. Resulta de uma separação da peça antes que o corte de seccionamento seja concluído. Uma das peças resultantes desse corte, por não estar bem fixada, cai devido ação da gravidade, gerando uma rebarba de interrupção na peça conforme mostrado na Figura 12:

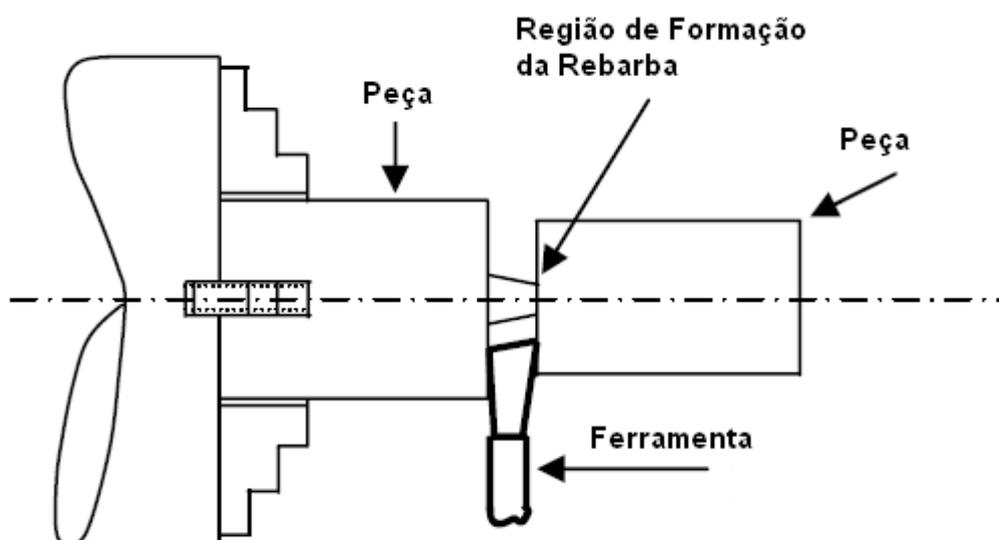


Figura 12 - Rebarba por Interrupção de Corte
 Fonte: Gillespie (1973).

As combinações de rebarbas descritas no capítulo 2.3.3 são as mais comuns e prováveis de encontrar em peças usinadas. No entanto, existem outros métodos para classificação de rebarba muito comuns, como pelo formato e também pelo mecanismo de formação. A razão pela qual o formato desempenha um papel importante nessa classificação está intimamente relacionado ao seu mecanismo de formação, que por sua vez permite fazer uma seleção adequada do processo de rebarbação.

A Figura 13 mostra fotos de rebarbas após o processo de furação:

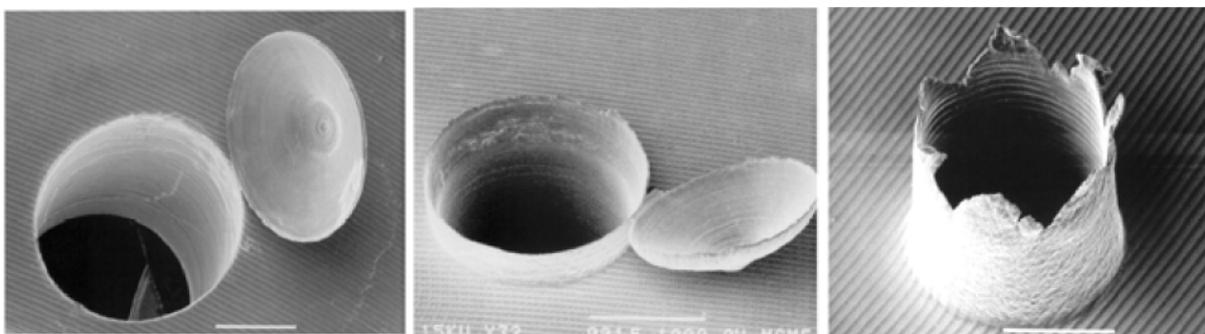


Figura 13 – Rebarbas Formadas durante Processo de Furação. À esquerda são rebarbas uniformes com capa e a direita é chamada de rebarba de coroa.
 Fonte: Dornfeld et. al (1999).

2.3.4 Rebarbação

O processo de rebarbação, mais especificamente na indústria metalúrgica, é um método de acabamento para retirar as rebarbas conseqüentes dos processos de fabricação mecânica, principalmente da usinagem. Essas rebarbas, em muitos casos, precisam ser removidas através do método de rebarbação, o que confere uma melhoria significativa, e às vezes essencial no acabamento das peças e componentes fabricados.

A técnica de rebarbação pode ser realizada por vários métodos. O mais comum deles seria o lixamento, que requer o uso de substâncias abrasivas, aplicadas com lixas com partículas abrasivas de modo que o metal sofra atrito, a fim de remover lascas finas e pequenas aparas na superfície da peça, contudo, esse trabalho manual gera uma pequena quantidade de partículas. Nesse caso, o emprego de máquinas lixadeiras é uma solução para se reduzir à remoção das aparas sem desperdiçar muitas partículas no ar, no entanto não é eficaz contra essas micro-partículas que podem ser aspiradas e ocasionar problemas respiratórios aos operários. Outro meio de rebarbar manualmente a peça é com a limagem, a lima é uma ferramenta manual ou mecânica, formada por uma dura haste de aço carbono dotada de ranhuras. É usada para desbastar e rebarbar outras peças, sejam elas de metais, como o aço, alumínio, bronze, latão, etc. ou outros materiais não metálicos como a madeira e certos plásticos (SOUZA, 2011).

Outros métodos de rebarbação exigem o uso de equipamentos específicos para suavizar entalhes e fragmentos. Os trabalhos de rebarbação tornam necessários durante a fabricação e acabamento de alguns tipos de componentes metálicos, uma vez que as rebarbas e aparas são comuns em costuras, bem como nas bordas. Todas as superfícies precisam ficar completamente lisas.

É imprescindível ressaltar que o processo de rebarbação é importante para garantir a qualidade, estética, padronização e bom funcionamento dos componentes mecânicos de uma máquina quando em fase de produção. Todos esses fatores se aplicam também para a segurança dos trabalhadores. Isso significa que, mesmo um pequeno entalhe pode causar ferimentos, criando um forte potencial de acidentes e lesões, culminando em atrasos desnecessários na produção. As bordas ásperas e aparas também são responsáveis por muitos acidentes decorrentes de fissuras e trincas causadas por falhas de rebarbação nas peças. Cada um desses problemas

(evitáveis) costuma custar às empresas uma grande quantia de recursos anualmente.

2.3.5 Presença de Rebarbas nos Processos de Fabricação

Em alguns casos, dependendo da aplicação do elemento mecânico, é admissível a presença de rebarbas, mas em outros casos a aplicação do produto exige a remoção da rebarba para seu correto funcionamento. Caso a rebarba não seja removida pode gerar situações de risco (exposição a arestas cortantes, danificar outros componentes do conjunto) e problemas de função (rebarba pode se desprender e travar o produto, causar defeitos mecânicos, etc...).

Exemplos de produtos que não permitem existência de rebarbas:

Corpos de bombas injetoras Diesel (Figura 14):



Figura 14 – Bombas Injetoras
Fonte: Kennametal (2004).

Nesses produtos tipicamente existe fluxo de diesel (combustível) em altíssimas pressões (até 2500bar), e a presença de rebarbas ou micro rebarbas poder gerar desprendimento de micro partículas que posteriormente chegariam ao bico injetor da bomba, componente no qual o furo de saída de combustível possui diâmetros da ordem de 1,5mm, causando conseqüentemente o entupimento do bico

e até mesmo a quebra do mesmo. A Figura 15 exibe algumas imagens de bombas injetoras.

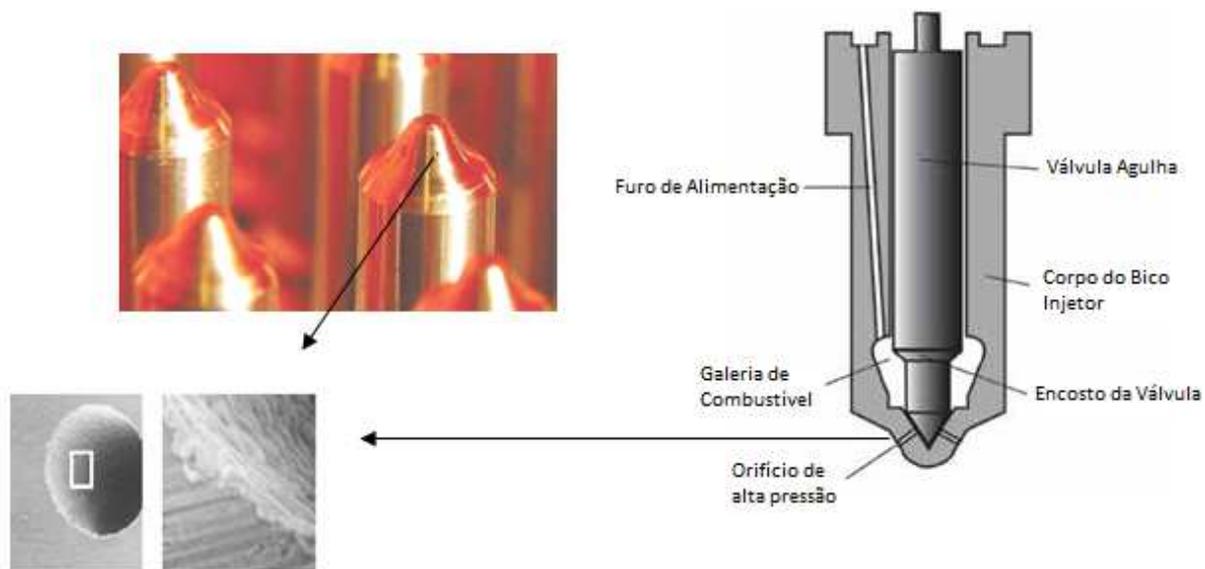


Figura 15 – Exemplos de peças usinadas por ECM
Fonte: Kennametal (2011).

Exemplo de produtos que permitem existência de rebarbas:

Conexões roscadas utilizadas comumente para sistemas hidráulicos e pneumáticos de baixa pressão (até 15bar) geralmente possuem rebarbas pertinentes ao processo de usinagem com ferramentas de corte, conforme Figura 16:



Figura 16 – Conexão Roscada
Fonte: Emmeti (2011).

A existência de rebarbas neste caso é permitida, pois não afeta a função do produto, não apresenta risco de qualidade e não gera conseqüências severas ao consumidor. Portanto, rebarbas podem ou não serem removidas dependendo da aplicação da peça em questão. Esse processo realizado subsequentemente é feita por processos de rebarbação, seja ele manual ou automatizado, isso para cumprir com as tolerâncias especificadas pelo projeto, mas elevando o custo do produto por acrescentar mais uma operação.

Existem vários métodos para a remoção de rebarbas, e a aplicação depende do tipo de processo de usinagem existente, da funcionalidade do produto e das exigências dos processos de fabricação posteriores. Os processos de rebarbação manuais mais comuns aplicados são: Rebarbação com escova abrasiva e com ferramentas rotativas. Existem também processos de rebarbação automáticos, o mais utilizado seria o processo de rebarbação eletroquímica (*ECM – Electrochemical Machining*).

2.4 USINAGEM ELETROQUÍMICA (ECM – ELETROCHEMICAL MACHINING)

Projetos e processos de fabricação mecânica complexos requerem um alto padrão de qualidade.

Em muitas áreas de fabricação as rebarbas devem ser eliminadas completamente, inclusive em pontos de difíceis acessos. Para conseguir atingir esses padrões a indústria desenvolveu um método que utiliza energia eletroquímica. Com isto é possível garantir a fabricação de contornos complexos com alta precisão de repetibilidade. Dentro dos processos que utilizam energia eletroquímica está o processo de ECM.

O processo ECM é uma operação de usinagem não-convencional classificada dentro do grupo de remoção, subgrupo eletroquímica.

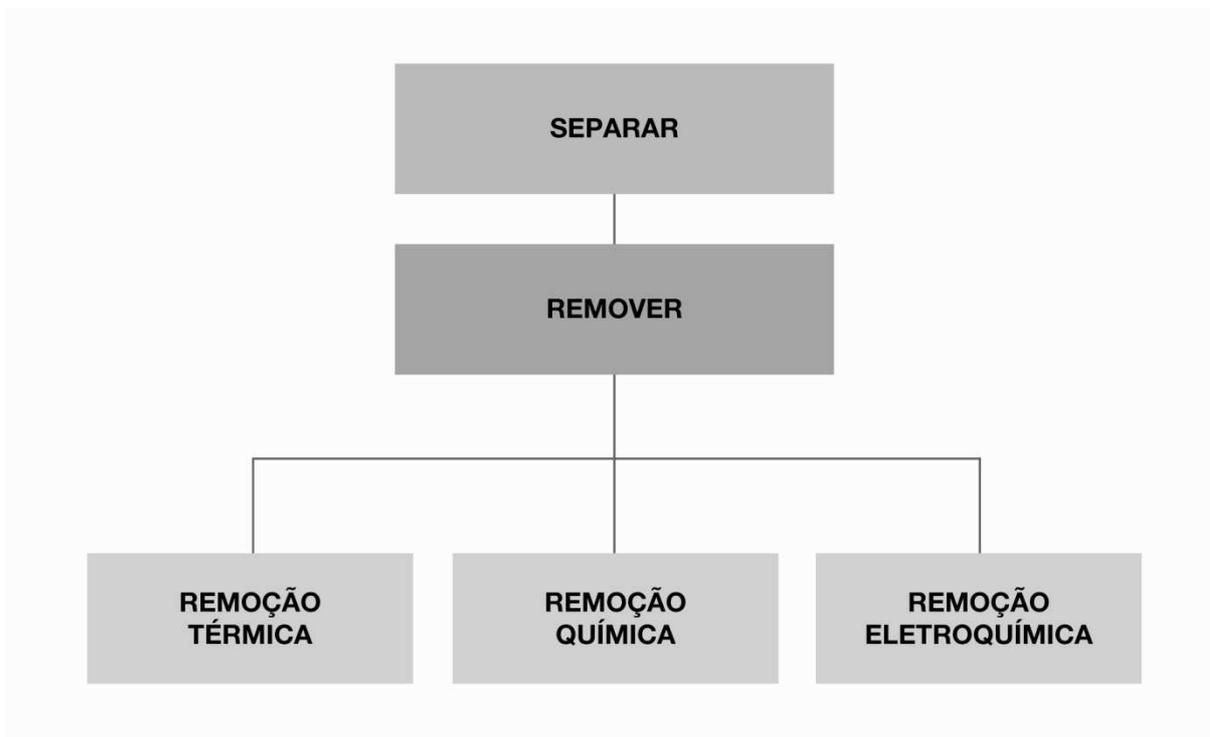


Figura 17 – Classificação dos Processos de Remoção
Fonte: DIN 8580 (2003)

A operação é baseada no processo eletroquímico de dissolução anódica de material condutor elétrico. Uma célula eletrolítica é criada, sendo a ferramenta (eletrodo) o cátodo e a peça para fabricação o ânodo. Para a usinagem do produto será fechado o circuito elétrico entre o ânodo e o cátodo por meio do eletrólito, que pode ser uma solução NaCl ou NaNO₃. Entre a peça e o eletrodo existe uma folga de trabalho, chamada de “fenda de trabalho”, onde ocorre uma troca de cargas, que conduz a corrosão do material. A taxa de corrosão será comandada pela intensidade da corrente e a duração do processo, já a formação do campo elétrico é de grande importância para a forma geométrica desejada. O hidroximetálico resultante será subtraído da circulação do eletrólito por um agregado de lavagem e tem de ser conduzido a uma central de tratamento. Trata-se de um processo específico de usinagem em metal a fim de atingir um contorno exigente da peça usinada. Além disso, retira as rebarbas resultantes dos processos de usinagem convencional. As principais aplicações para o processo ECM: rebarbação, usinar contornos e rebaixar (KÖNIG, 2006).

A Figura 18 ilustra o esquemático da eletrólise:

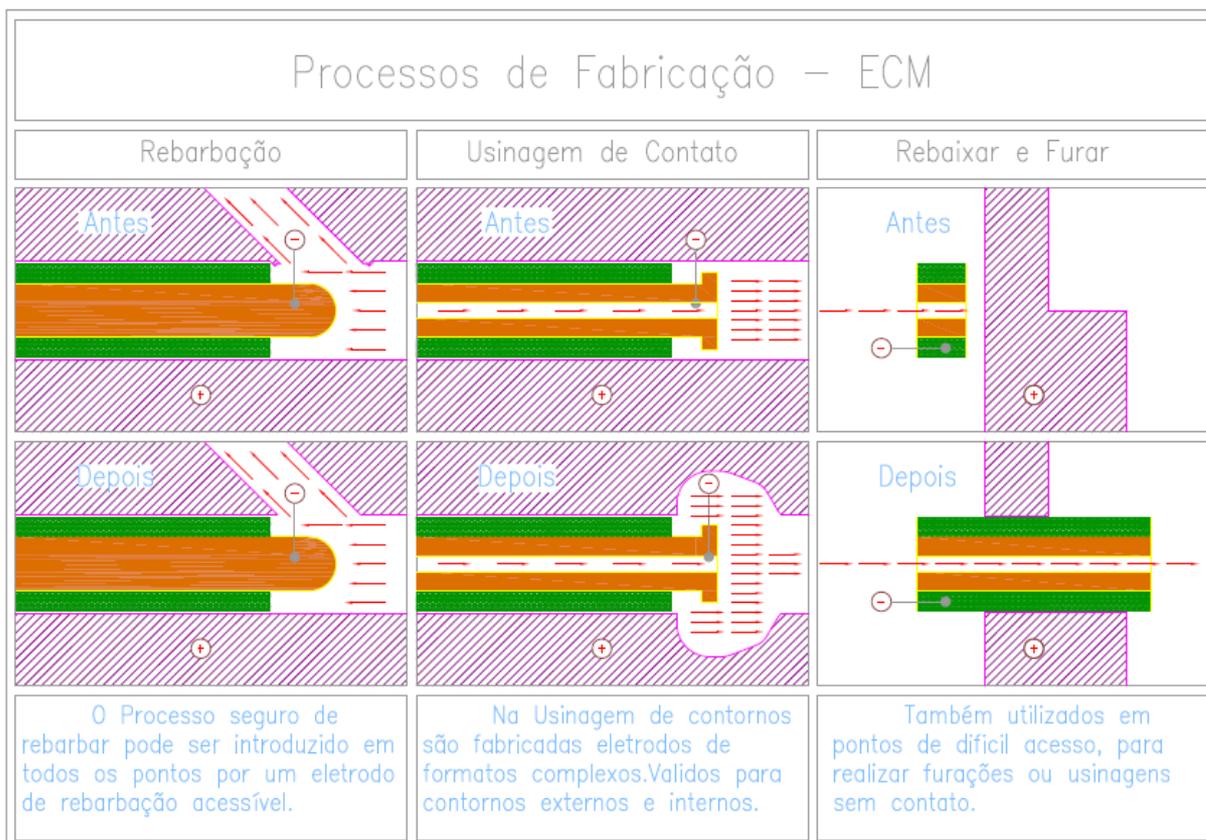


Figura 18 - Representação esquemática das aplicações da ECM
Fonte: Emag (2011).

Nos processos de rebarbação e usinagem de contornos, a ferramenta (eletrodo) permanece sem movimentos de avanço durante o processo. Quanto aos processos de rebaixar e furar existe o avanço da ferramenta durante o processo.

2.4.1 Rebarbação Eletroquímica

A rebarbação eletroquímica é uma derivação do processo ECM, projetada para remover rebarbas provenientes de processos de furação, fresamento e torneamento. Está incluída dentro do processo de eletroerosão química no subgrupo “Produção Eletroquímica de Formas”, conforme Figura 19:

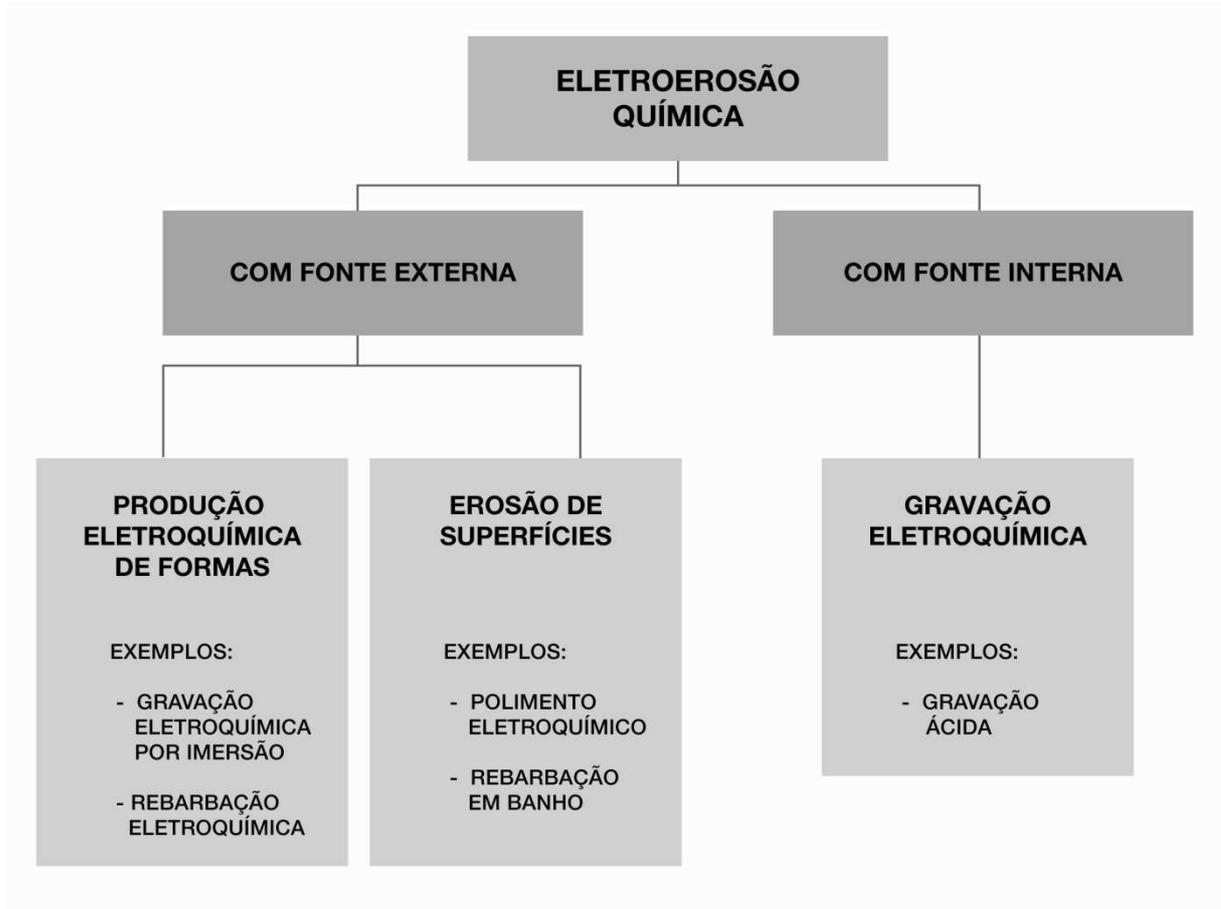


Figura 19 – Subdivisão dos processos de Eletroerosão
Fonte: DIN 8580 (2003)

O processo de rebarbação ECM é aplicado na maioria das vezes em áreas da peça na qual outros processos de rebarbação não conseguem atingir, como encontro de furações.

A operação só é viável para produções em série de grande escala, isso devido aos altos custos de ferramenta (eletrodo) e equipamento. A fim de evitar problemas como, curto-circuitos, oxidações ou camadas de materiais isolantes de eletricidade, a peça deve passar por um processo de lavagem, dessa forma garantindo uma remoção de material uniforme.

A Figura 20 ilustra uma superfície sem rebarbação e posteriormente com o processo de rebarbação eletroquímica:

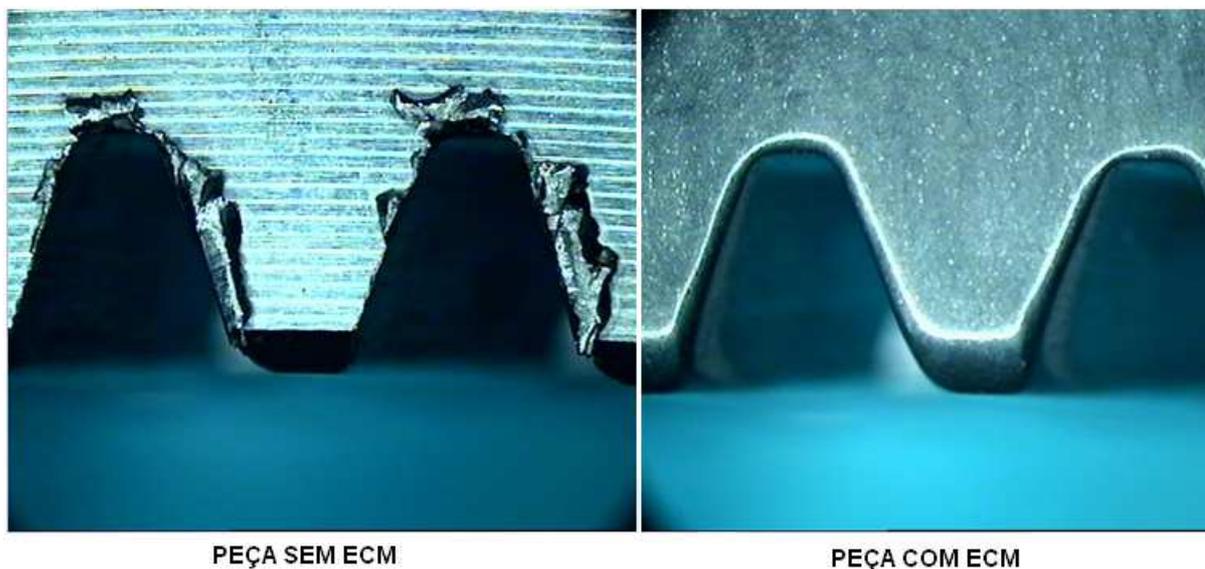


Figura 20 – Demonstração da Rebarbação Eletroquímica
Fonte: Emag (2011).

2.4.2 Reação Química e Parâmetros do Processo

No processo de rebarbação o eletrólito é composto de uma solução aquosa que consiste em 5 a 20 % do volume da cuba em cloreto de sódio (NaCl) ou nitrato de sódio (NaNO₃).

Para que o processo ocorra de maneira desejada, é necessário mensurar e controlar diversas grandezas, tais como, pH, pressão, temperatura, velocidade do fluxo do eletrólito, tensão de trabalho e tempo de usinagem.

Neste trabalho foi considerado o processo ECM trabalhando com corrente contínua, mas também existe processo ECM que trabalha com oscilações na corrente elétrica, denominado "*Pulse Electrochemical Machining (PECM)*".

Faixa de parâmetros comumente utilizados:

- Fonte de tensão: corrente contínua (Entre 5 Volts e 30 Volts).
- Corrente elétrica: 3 a 40.000 A.
- Condutividade do eletrólito: 100 a 350 mS.
- Temperatura do eletrólito: 24 a 65 °C.
- Fluxo de eletrólito: 1 l/min para cada 100 A de corrente elétrica.

- Pressão de eletrólito: 3 a 20 bar.
- PH: para uma solução de NaNO_3 é comum manter o $\text{PH}=7$, necessitando de um agente externo para o controle. Quando a solução é de NaCl isso não é necessário.
- Tempo de usinagem: 5 até 40 s, em trabalhos de rebarbação.
- Velocidade do fluxo do eletrólito: entre 2 a 10m/s

(KENNAMETAL, 2004)

O processo de ECM confere a peça processada características superficiais de rugosidade de superfície (R_a) da ordem de 0.05 a 2.5 μm , geralmente não há tensão residual após processo ECM. Em relação ao diâmetro da peça usinada geralmente este método é aplicado em diâmetros maiores que 0,4mm. As tolerâncias usuais para um processo de rebarbação de encontro de furos ou criação de raio em cantos vivos é da ordem de $\pm 0,2\text{mm}$.

A Figura 21 representa um equipamento de rebarbação eletroquímica:

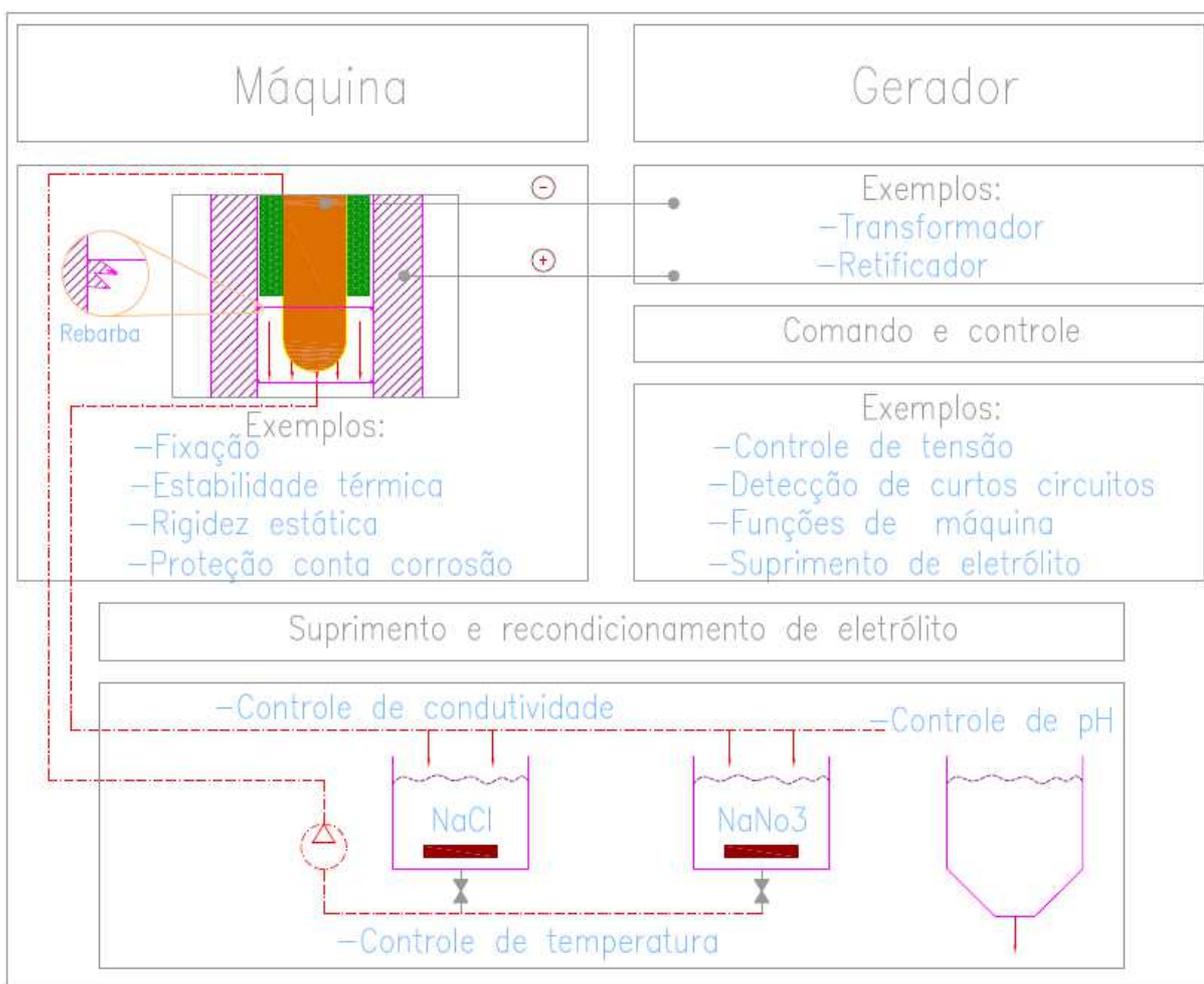
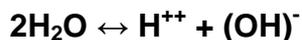


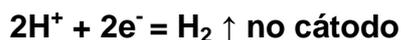
Figura 21 - Esquemático do equipamento ECM
 Fonte: König (2006)

Em se tratando de reação química a remoção de material ocorre através da eletrólise, na qual a água (H₂O) e o sal (NaCl) sofrem uma dissociação iônica, quando nela é aplicada uma tensão. Formando:



A tensão aplicada entre o anodo (peça) e o cátodo (ferramenta), faz com que íons positivos avancem em sentido ao catodo (ferramenta), e íons negativos avancem em sentido ao anodo (peça).

Assim os íons de hidrogênio da solução eletrolítica, retiram elétrons do catodo (ferramenta), gerando gás hidrogênio.



Da mesma forma os átomos de ferro do anodo (peça), irão se desprender gerando, (ferro eletrolítico).



Os íons de ferro (Fe) eletrolítico reagem com os íons de cloro (Cl), provenientes da dissociação iônica do eletrólito, formando cloreto de ferro, também conhecido como cloreto ferroso.



Da mesma maneira os íons de sódio (Na), reagem com a hidroxila (OH) proveniente da dissociação iônica do eletrólito, formando hidróxido de sódio.



Após as reações o Cloreto de Ferro e o Hidróxido de Ferro se precipitam no fundo da cuba, formando uma espécie de “lodo” (KÖNIG, 2006).

A Figura 22 ilustra a reação que ocorre na eletrólise:

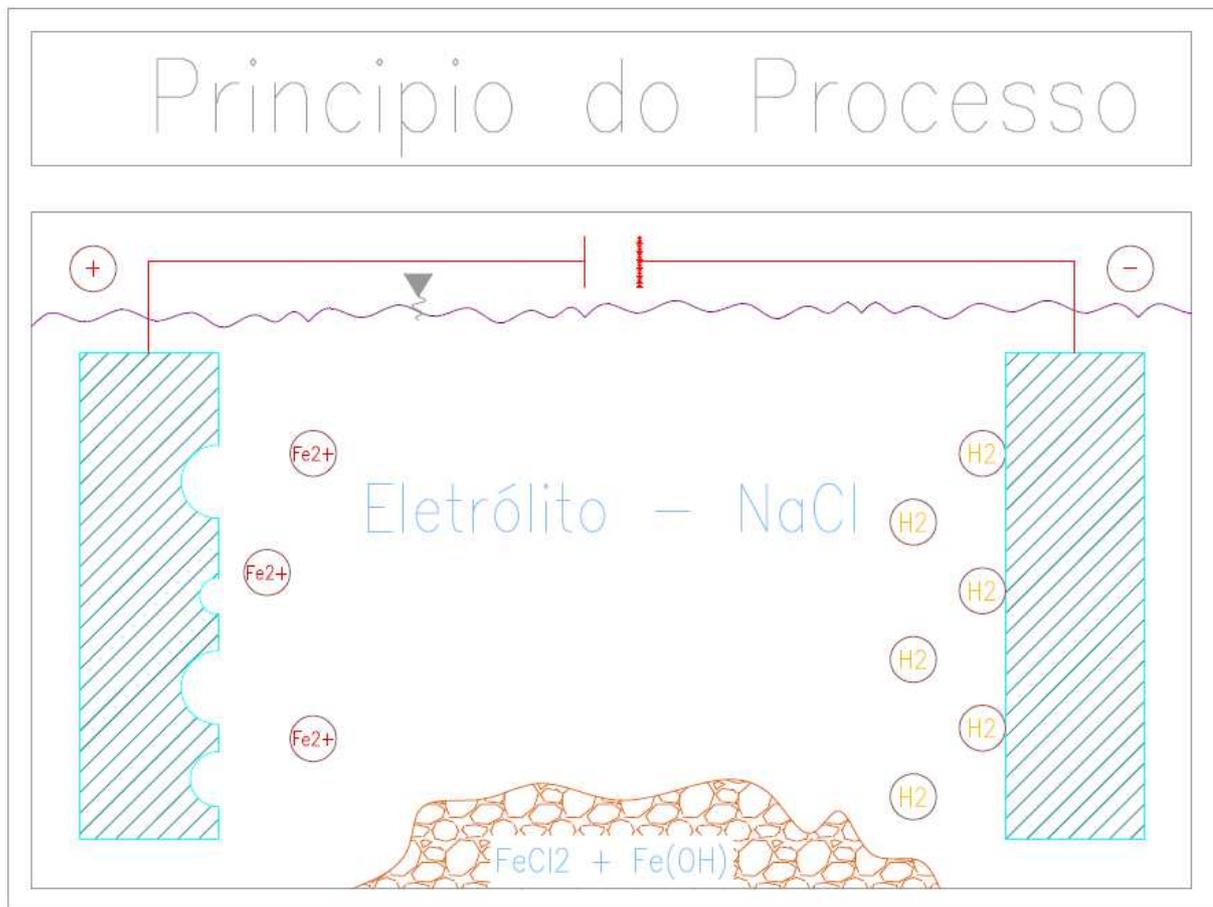


Figura 22 – Princípio do Processo Eletrolítico
Fonte: König (2006).

2.4.3 Vantagens e Limites do Processo ECM

Como vantagens temos as seguintes características:

- A dureza e a resistência do material não tem influência sobre o processo.
- Alta rentabilidade em um grande número de peças.
- Nenhuma carga térmica ou mecânica nas peças usinadas.
- Peças de paredes finas podem ser usinadas sem deformação.
- Possível usinar em locais de difícil acesso.
- Processo de fácil adaptação no fluxo de linha.
- Tempo de usinagem curto.

Como limites do processo temos as seguintes características

- O processo ECM torna-se relativamente caro para produção de produtos em baixa escala.
- Não é possível obter arestas com cantos vivos e sem rebarbas.
- Canais com largura reduzida e com profundidades grandes não podem ser obtidos com eletrodos estacionários.
- Peças sem condutividade elétrica não podem ser usinadas. (Exemplo: aço nitretado, alumínio anodizado).

3 TESTES E ENSAIOS

3.1 MATERIAIS

O material utilizado para fabricação do produto é o aço SAE 4144. Trata-se de um aço Cromo-Molibdênio, sendo Cromo (aproximadamente 1%) e Molibdênio (aproximadamente 0,2%) e atinge alta resistência através de tratamento térmico de têmpera e revenido. Segue Tabela 1 expondo sua composição:

Tabela 1– Composição Aço SAE 4144

Material	Qtde.	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo
SAE 4144	Min	0,42	0,9	-	0,01	0,2	-	1,15		0,25
	Máx	0,46	1	0,025	0,02	0,3	0,35	1,3	0,25	0,35

Fonte: Aços Villares S.A (1998).

3.1.1 Microestrutura, Dureza e Ensaio de Risco do Aço SAE 4144

Para verificação da microestrutura, dureza e do risco foi necessária uma amostra de material SAE 4144 sem tratamento e uma com tratamento de têmpera e revenido com uma temperatura de austenitização de 850°C e a temperatura de revenimento de 600°C. As dimensões da amostra são conforme Figura 23:

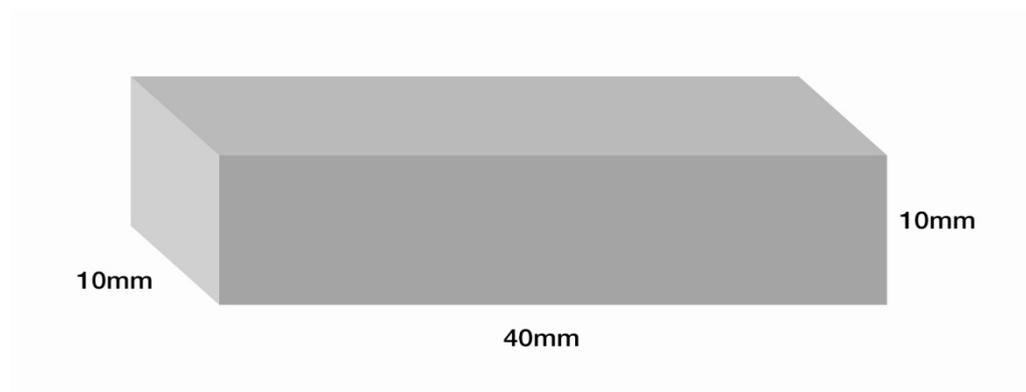


Figura 23 – Representação da Amostra
Fonte: Bru (2006).

Nas micrografias do aço temperado e revenido observou-se a presença de martensita fina revenida. A martensita é caracterizada principalmente por apresentar elevada dureza, desta forma, espera-se dureza superior com este beneficiamento em relação ao material sem tratamento. (ASM, 2000). Segue abaixo a Figura 24:

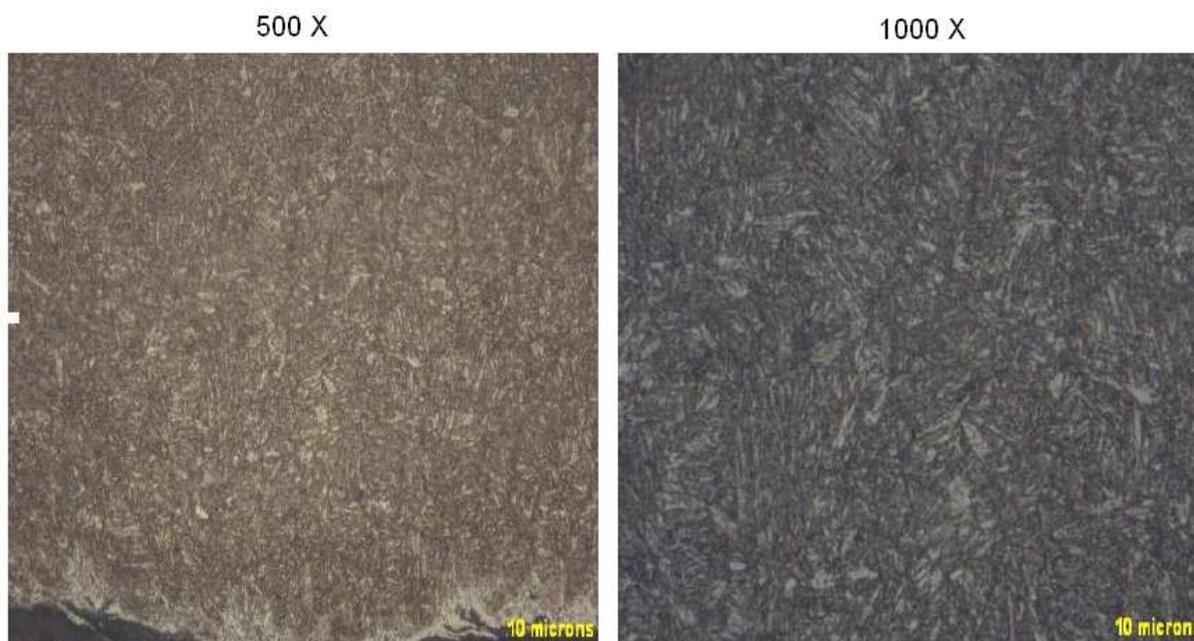


Figura 24 – Microestrutura da seção transversal da superfície temperada e revenida do aço SAE 4144
Fonte: Bru (2006).

Nos testes de macrodureza o aço SAE 4144 temperado e revenido apresentou acréscimo de dureza em relação ao mesmo aço sem tratamento. As medidas de dureza Rockwell C são de aproximadamente 33 HRC para o aço sem tratamento e de 39 HRC para o aço com tratamento, conforme ilustra Figura 25:

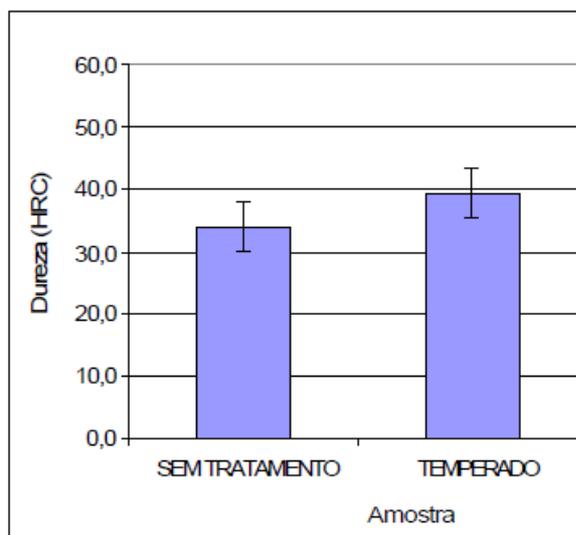


Figura 25 - Macrodureza HRC

Fonte: Disponível em <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_071_RodrigoBru.pdf> Acesso em 02 out. 2011.

Nos testes de Microdureza observa-se uma redução da dureza conforme a aproximação do núcleo para aço temperado e revenido e um aumento de dureza do aço sem tratamento, conforme mostra a Figura 26:

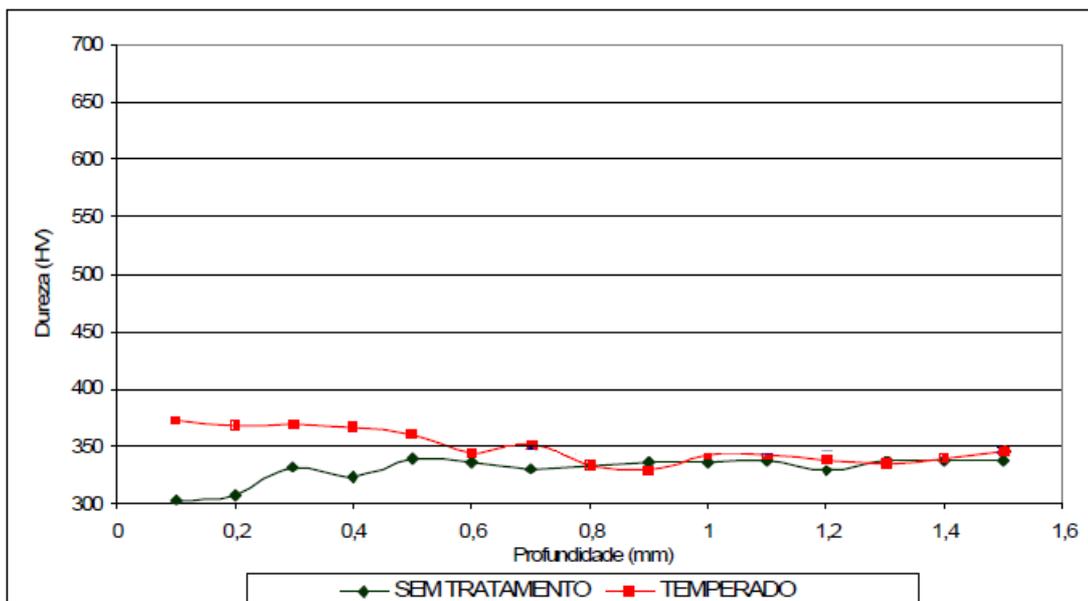


Figura 26 – Perfil de dureza das Amostras
Fonte: Bru (2006).

Em ensaios de tração e compressão, a amostra do aço sem tratamento apresentou trincas a 75 N de esforço, já no aço com têmpera e revenimento nota-se uma melhora na resistência de risco, as primeiras trincas aparecem só com a aplicação de 150 N, sem contar que não são tão acentuadas quanto as do material sem tratamento a 75 N. A Figura 27 mostra fotos do ensaio:

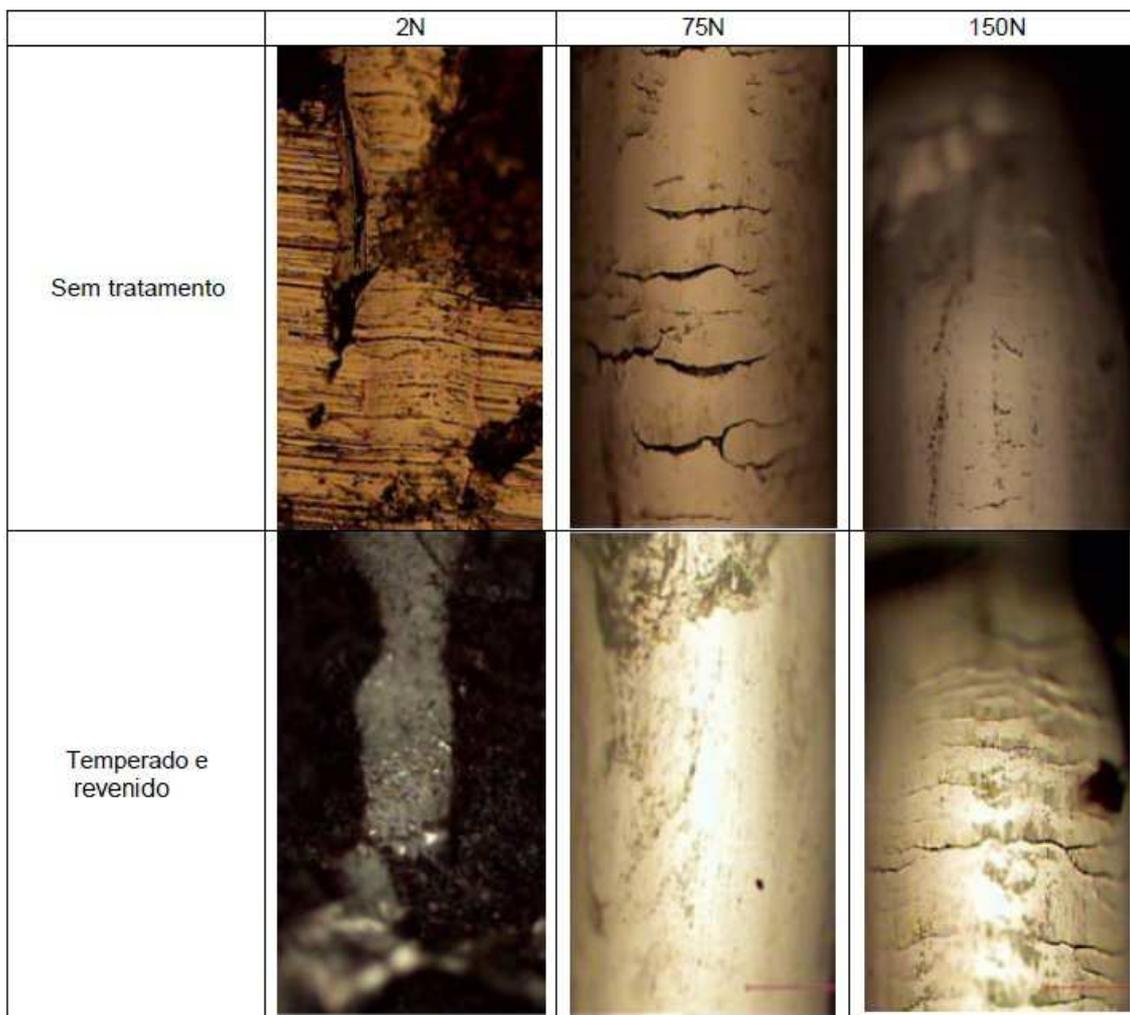


Figura 27 – Ensaio de Tração do Material Sem Tratamento e Com Tratamento
Fonte: Bru (2006).

Toda a preparação das lâminas, testes de dureza, micrografia, ensaios, fotos, apresentados neste capítulo foram feitos pelo M. Eng. Mec. Rodrigo José Wanda Bru na dissertação “Avaliação Mecânica de Superfícies do Aço SAE 4144”, para a obtenção do grau de mestre em engenharia mecânica, no programa de pós-graduação em engenharia mecânica do setor de tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

4 METODOLOGIA

Os problemas gerados pelo processo de rebarbação manual e a necessidade de melhoria contínua do processo, levaram a uma reestruturação desta etapa do processo. A Figura 28 mostra o processo de rebarbação manual:

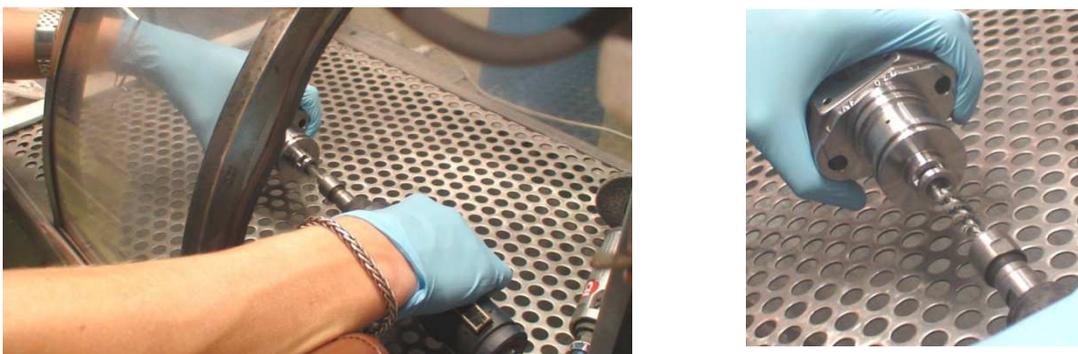


Figura 28 – Fotos do Processo de Rebarbação Manual
Fonte: Autoria própria

A idéia de automatizar a rebarbação através do processo ECM surgiu durante reuniões que ocorreram na fábrica. Em uma destas reuniões identificou-se que a estação inferior da ECM já existente no processo poderia receber mais três eletrodos, e desta forma havia a possibilidade de aproveitar todos os recursos do processo de ECM para a rebarbação automática. A Figura 29 ilustra a área da peça em que é necessária a automatização da rebarbação.

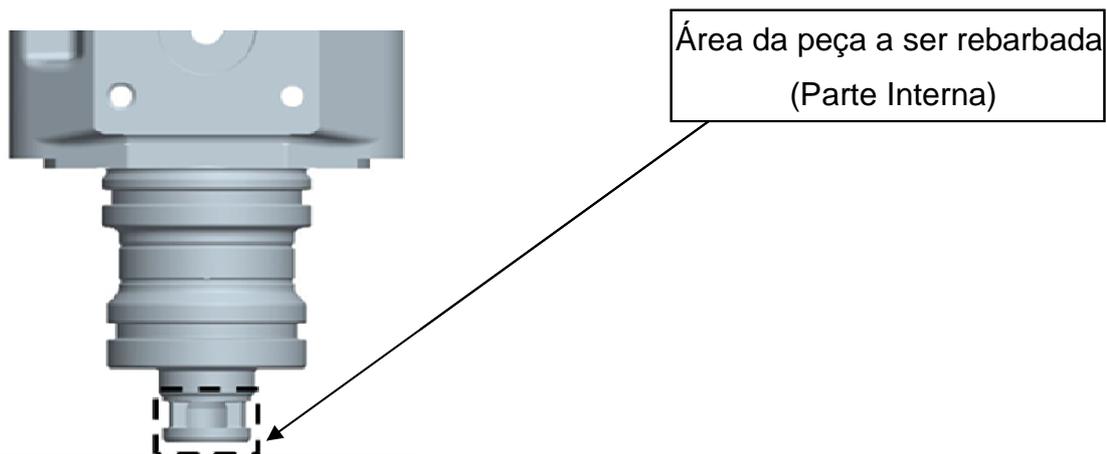


Figura 29 – Área de Rebarbação (encontro entre furo e rasgo de chaveta)
Fonte: Autoria própria

4.1 ASPECTOS DO PROCESSO

Após surgimento da idéia foram analisados diversos aspectos para confirmar a viabilidade técnica de automatizar o processo. Alguns desses aspectos determinantes foram checados conforme descrito neste capítulo.

4.1.1 Capacidade do gerador de corrente da máquina

Foi feita uma medição do consumo de corrente elétrica, com um amperímetro, para analisar se o gerador da máquina teria capacidade de fornecer energia ao processo após a inserção de novos eletrodos. O valor da corrente medido foi comparado ao valor da corrente nominal indicada pelo fabricante do equipamento. Após a comparação verificou-se que o gerador possui capacidade de fornecimento de energia.

4.1.2 Vazão e pressão de eletrólito

A vazão máxima de eletrólito foi dimensionada através do estrangulamento do fluxo de eletrólito na entrada dos eletrodos, foi necessário adicionar três novas válvulas de controle de vazão do modelo “2BVM-Aco Inox”. Sua pressão nominal é de 138 bar de pressão e o material é o aço Inox 316, conforme mostra Figura 30.



Figura 30 - Válvula para controle de pressão do Eletrólito
Fonte: Stauff (2011).

4.1.3 Tempo de ciclo requerido

O tempo de ciclo da operação foi um dos fatores limitantes, não foi possível alterar o ciclo atual, desta forma foi necessário adequar à geometria do eletrodo e a distancia até a peça para atingir o resultado esperado.

4.1.4 Custo das ferramentas em comparação com o processo atual

Ferramental do Processo

- Eletrodo: Ferramenta de trabalho, “cátodo”, produzido com material condutor, exemplo: Aço, Bronze, etc...

- Máscara: Material isolante utilizado para limitar o campo de atuação do eletrodo e desta forma atingir apenas as áreas desejadas, geralmente feito com material polímero isolante.

Após aprovação do projeto uma das preocupações foi implementar o novo processo sem aumentar o custo com ferramentas na produção do produto. Para atingir este objetivo o material utilizado no desenvolvimento dos primeiros protótipos de máscara foi alterado. O material utilizado anteriormente era o Tecapeek.

O Tecapeek, Polietercetonaetercetona, é um polímero de alta performance semi-cristalino comumente utilizado na fabricação de máscaras para processo ECM devido a suas propriedades mecânicas superiores. Ele se destaca pela sua alta resistência mecânica, além de possuir alta resistência termo-mecânica,

ótima resistência química, à hidrólise e ao desgaste, e é um material tenaz de fácil usinagem.

Após testes iniciais identificou-se que a máscara sofreu baixo desgaste, e foi construído um protótipo com o politec 1000.

O Politec 1000, Polioximetileno, é um polímero de engenharia também utilizado de forma freqüente para fabricação de máscaras de processo ECM. Ele possui basicamente as mesmas propriedades do Tecapeek

O Politec 1000 obteve resultados satisfatórios, o protótipo sofreu um baixo desgaste. No entanto, foi feita uma relação de custo entre os dois materiais, sendo que o Politec 1000 foi o material escolhido tendo um custo cinco vezes menor que o Tecapeek, e apresentou resultados bons durante os testes e foi aprovado.

4.2 ALTERAÇÃO DO PROJETO DO PRODUTO

Com os resultados preliminares foi possível dimensionar a área afetada pela rebarbação ECM, e desta forma incluir estas características no desenho de produto.

Como as características deste novo processo não afetaram o funcionamento do produto não foram necessárias avaliações em motores de teste ou testes de campo.

Após avaliação dos aspectos técnicos envolvidos nesta mudança, o projeto foi apresentado e a continuação do mesmo foi aprovada, conforme formato atual.

Com o projeto aprovado iniciou-se a coleta dos dados para o projeto das ferramentas, com todos os dados dimensionais do processo foi possível fazer o primeiro projeto das ferramentas.

Para o projeto das ferramentas (Eletrodo e máscara) foram levados em consideração diversos fatores descritos a seguir.

4.2.1 Geometria do Eletrodo

A geometria do eletrodo foi definida para garantir principalmente duas características do processo: otimizar o fluxo de eletrólito para facilitar a remoção do material desprendido durante a operação de usinagem eletroquímica e garantir a uniformidade da área rebarbada em todo o contorno.

4.2.2 Distância Entre a Peça e o Eletrodo

A remoção de material aumenta de forma inversamente proporcional a distancia entre a peça e o eletrodo, dessa forma essa distância foi dimensionada através da definição da profundidade máxima que a rebarbação pode atingir.

4.2.3 Área exposta do eletrodo

Foi projetada de acordo com a área do produto que deveria ser impactada pelo processo de rebarbação, pode-se visualizar na Figura 31 a área permissível para a rebarbação (1), a área que não deve ser atingida pela rebarbação (2).

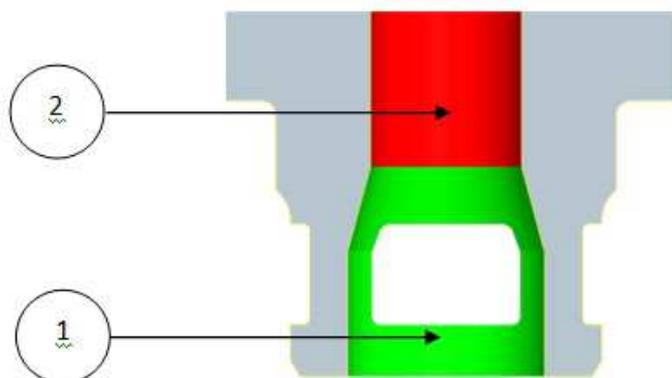


Figura 31 - Área de Rebarbação
Fonte: Autoria própria

4.2.4 Máscara

A máscara foi dimensionada para isolar o eletrodo das áreas da peça onde a operação de rebarbação não deveria atacar, além da função de isolamento a máscara determina o fluxo de eletrólito para a operação, a maior parte do fluxo de eletrólito deve ser direcionada para as áreas onde a rebarbação tem que remover mais material.

4.2.5 Definição do Processo

Com a finalização do projeto do eletrodo e da máscara, foi realizada uma reunião com especialistas para apresentação do projeto. Foi realizado o primeiro “*Brainstorming*” sobre as ferramentas e o processo.

Após aprovação durante a reunião, iniciou-se a fase de execução dos protótipos de ferramental. A Figura 32 ilustra a máscara e o eletrodo aprovados:

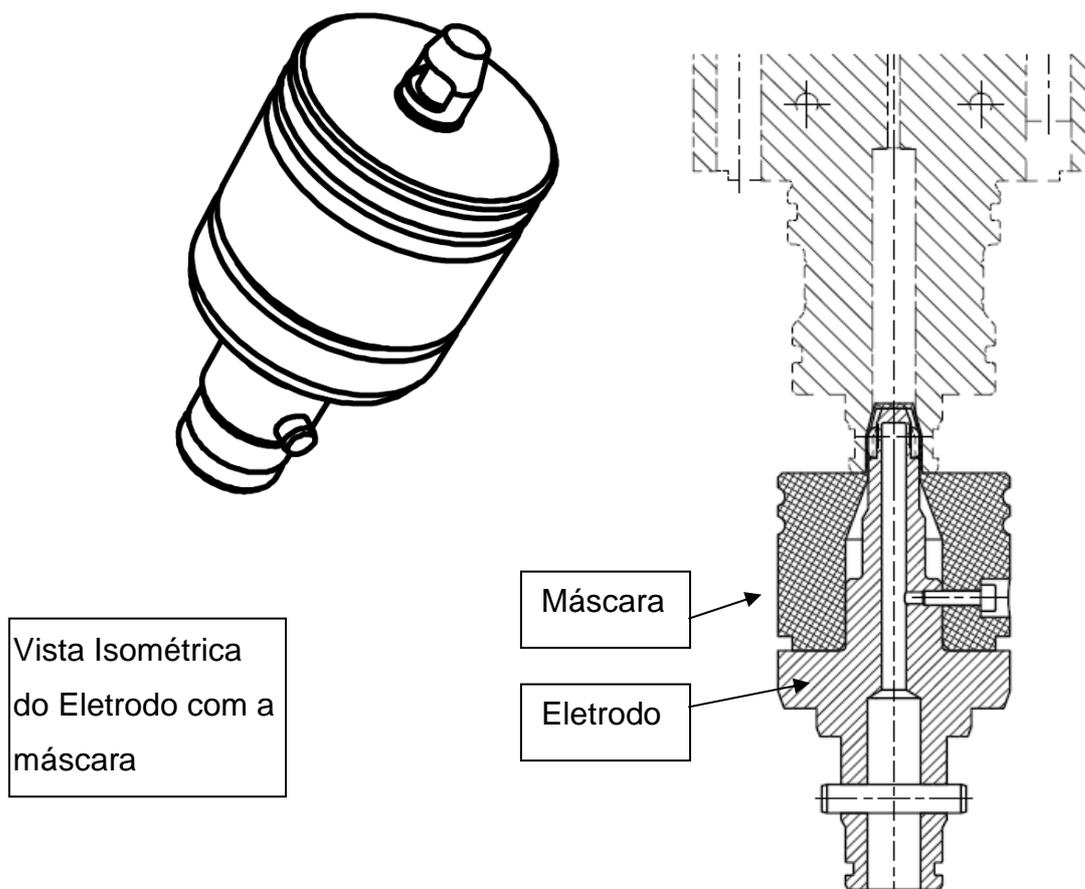


Figura 32 – Representação da ferramenta (eletrodo + máscara)
Fonte: Autoria própria

Após projeto e aquisição do primeiro ferramental foi feito o cronograma de trabalho, com base nas restrições de utilização da máquina. A ECM em questão trabalha em sistema de 03 turnos diariamente, o que limita bastante a disponibilidade da máquina para a realização de testes práticos, todos os testes executados ocorreram aos sábados. Abaixo seguem os parâmetros, os quais já estavam pré-definidos do processo anterior:

- Fonte de tensão: 14V DC.
- Corrente elétrica: $\pm 45A$ por peça.
- Condutividade do eletrólito: 170mS.
- Temperatura do eletrólito: 45°C.
- Pressão de eletrólito: 6BAR.
- Tempo de ciclo: 45s.

5 DISCUSSÕES

No primeiro teste prático foi necessário adaptar a máquina para receber a parte de controle dos novos eletrodos. Foi necessário passar os cabos dos sensores até o painel elétrico e habilitar a entrada referente aos sensores no CLP da máquina, após adaptação eletrônica foi feita à nova programação no CLP e foram instalados os novos eletrodos. Depois das adaptações foi feita uma simulação sem peças (ciclo em vazio). Aprovado o funcionamento sem as peças, foram produzidas as primeiras amostras. Neste primeiro teste foi evidenciada a necessidade de aumentar a distância entre o eletrodo e a peça em 1mm para reduzir a remoção de material na área afetada, conforme mostra Figura 33:



Figura 33 - Peça em Corte da Peça Usinada por Rebarbação Eletroquímica
Fonte: Autoria própria

Após primeiro teste bem sucedido, foram identificados os pontos de melhoria. Após implementadas foi feito um teste definitivo para verificar o comportamento do processo após períodos maiores de produção. Tudo correu conforme planejado, sem falta ou remoção excessiva.

Somente após validação dos testes foi iniciada a compra de ferramental para produção em série e foi iniciada a validação da mudança de proposta com a engenharia de produto e com os clientes envolvidos.

Para receber a aprovação dos clientes foi necessário enviar amostras do produto com o novo processo para avaliação. Após receber a aprovação oficial dos clientes foi concluída a validação interna com a engenharia de produto. Finalizada a etapa de aprovação, o novo ferramental foi adquirido para implementar o novo processo na produção seriada.

5.1 INSTRUMENTOS DE INSPEÇÃO E EXAME UTILIZADOS.

Para verificar as características do novo processo, os instrumentos de medição utilizados foram o endoscópio e perfilômetro.

5.1.1 Endoscópio

A Figura 34 mostra o endoscópio:



Figura 34 – Endoscópio
Fonte: Karl Storz (2011).

Sistema de endoscopia com ampliação de até 80 vezes, utilizado para avaliar se existem deformações na área afetada pelo processo, rebarbação excessiva, imperfeições e acabamento superficial.

5.1.2 Perfilômetro

A Figura 35 mostra o endoscópio:



Figura 35 – Perfilômetro
Fonte: Zeiss (2011).

Equipamento utilizado para verificar a extensão e a profundidade da área afetada pelo processo ECM.

Os equipamentos de medição citados (Endoscópio e Perfilômetro) foram utilizados para medir as características do novo processo durante os testes e posteriormente durante a produção em série.

5.2 FLUXO DO PROCESSO

Na figura 36 temos o fluxograma do processo completo antes da implementação do processo proposto:

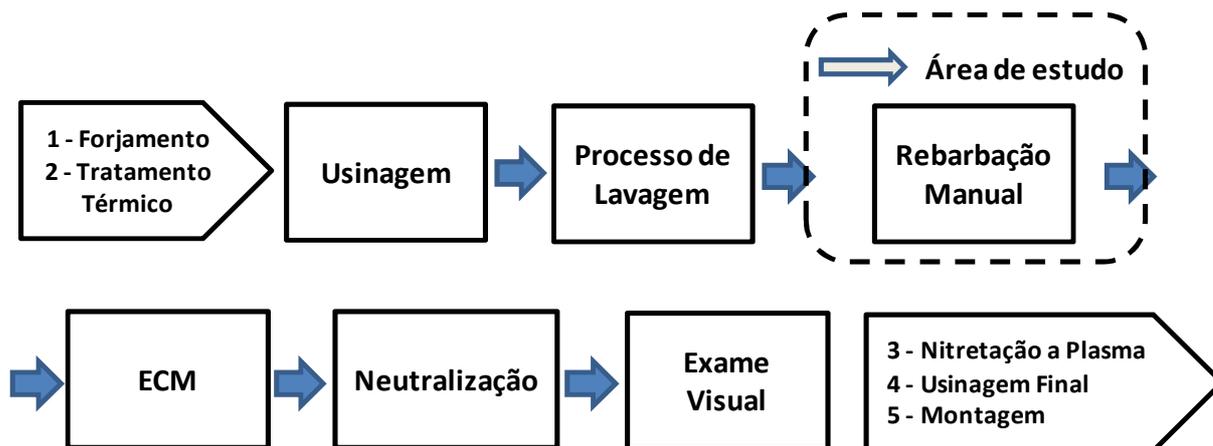


Figura 36 – Fluxo do Processo com Rebarbação Manual
Fonte: Autoria própria

O processo de fabricação da peça citado neste projeto começa com o processo de forjamento a frio da matéria prima, logo em seguida a peça passa por tratamentos de têmpera, revenimento e cementação (denominados de “tratamento térmico” no fluxo), logo em seguida a peça passa pelo estágio de usinagem. Após a peça ser usinada ela é lavada para remover o óleo de usinagem e é iniciada a etapa de rebarbação manual. Após rebarbada a peça passa pelo estágio de ECM, em seguida é neutralizada para remover o sal proveniente da ECM e é feito o exame visual com endoscópio. Após os processos acima a peça passa por um tratamento de superfície chamado de Nitretação a plasma, e é iniciada a usinagem final. Na usinagem final a peça é retificada e brunida, em seguida a peça é lavada e montada.

As etapas do processo relevantes para este projeto estão marcadas e identificadas como “área de estudo”. Na figura 37 temos o fluxograma do processo atual, após implementação do projeto.

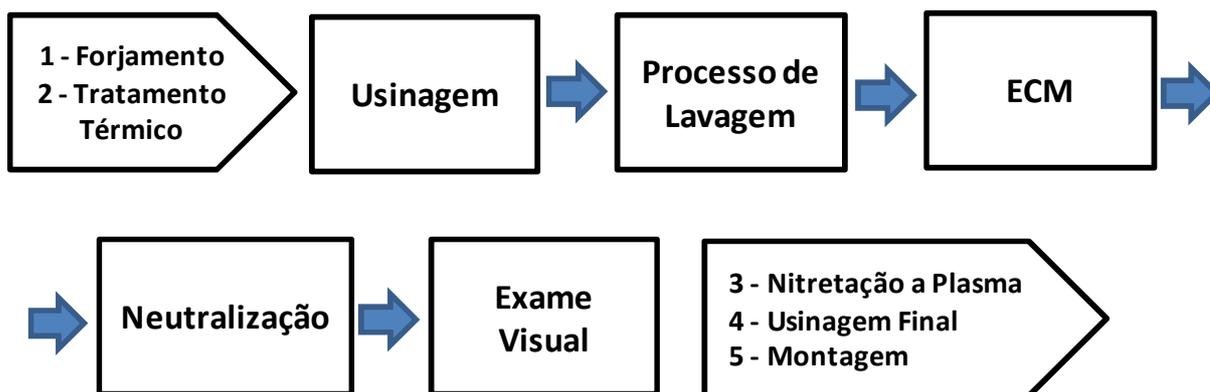


Figura 37 – Fluxo do Processo com Rebarbação Eletroquímica
Fonte: Autoria própria

Podemos notar que em comparação com o fluxograma inicial foi eliminada uma etapa de processamento, com isto a produtividade foi elevada, o tempo de processamento da peça foi reduzido, a ergonomia da produção foi melhorada e a confiabilidade do processo foi aumentada.

6 RESULTADOS

A avaliação de todos os aspectos da mudança de forma antecipada facilitou a introdução da modificação. Como resultado geral verificou-se melhorias tanto no processo quanto no produto.

Como melhorias na qualidade do processo temos:

O processo de rebarbação desenvolvido elimina a operação manual existente na linha de produção, sendo que os 3 colaboradores que trabalhavam nesta operação (1 colaborador por turno, no total são 3 turnos) foram realocados internamente na empresa.

O novo processo automático de rebarbação é mais confiável que o anterior, pois a qualidade da operação não depende da habilidade do operador, da condição de desgaste da ferramenta pneumática, do tamanho da rebarba gerada pela usinagem, etc.

No processo manual utilizava-se uma ferramenta pneumática com escovas abrasivas, este processo gerava resíduos na bancada de rebarbação e nos postos de trabalho mais próximos. Após introdução do processo automático foi eliminada a geração de resíduos e desta forma os colaboradores hoje trabalham em um ambiente mais limpo e livre de resíduos gerados pela rebarbação manual.

Com a redução dos resíduos na peça e nos postos de trabalho foi possível eliminar a etapa de limpeza com ar comprimido antes do processo ECM, que era feito para eliminar partículas abrasivas desta área da peça.

Como melhorias na qualidade do produto temos:

O processo automático não requer manuseio adicional da peça, ou seja, está integrado a outra operação já existente no fluxo produtivo. Desta forma a possibilidade de gerar danificações na peça devido a batidas é minimizada. Outro aspecto importante é que também foi eliminada a possibilidade de danificações na peça devido a batidas que ocorriam durante a operação de rebarbação manual com ferramenta pneumática.

Comparativo de qualidade de rebarbação (Processo anterior x Novo Processo). Na Figura 38 podemos verificar a qualidade da operação manual:

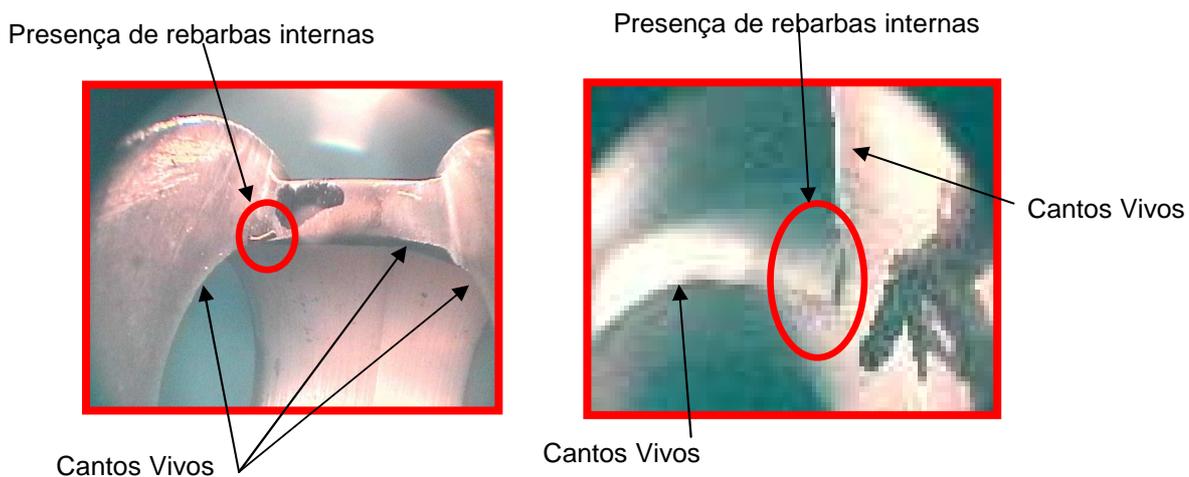


Figura 38 – Rebarbas encontradas no processo
Fonte: Autoria própria

É possível identificar pequenas rebarbas e cantos vivos nas peças mesmo após processo de rebarbação manual. Na Figura 39 verifica-se a qualidade da peça após o processo ECM:



Figura 39 – Peças após processo ECM
Fonte: Aatoria própria

O novo processo apresentou resultados muito bons, as peças usinadas não apresentam rebarbas e cantos vivos.

7 CONCLUSÃO

A automação de processos é uma ferramenta fundamental para as empresas no contexto industrial moderno, pois é possível atingir de forma simultânea diversas melhorias como: ganhos de produtividade com baixos investimentos, melhoria de ergonomia nos processos, aumento de produção e melhoraria da lucratividade, dentre outros aspectos positivos.

Além de atingir todos os objetivos citados neste trabalho, foram identificados alguns benefícios adicionais atribuídos a esta melhoria. No processo manual utilizava-se uma ferramenta pneumática com escovas abrasivas, este processo gerava resíduos na bancada de rebarbação e nos postos de trabalho mais próximos, após introdução da automatização foi eliminada a geração de resíduos e desta forma os colaboradores hoje trabalham num ambiente livre de resíduos gerados pela rebarbação manual, ou seja, mais agradável e saudável.

Com a redução dos resíduos na peça e nos postos de trabalho foi possível eliminar uma etapa de sopro manual da peça que existia antes do processo ECM, o mesmo que era realizado para eliminar partículas abrasivas desta área da peça.

É possível também mensurar o sucesso do projeto em termos de indicadores de desempenho, em termos comparativos temos um aumento de produtividade de 8% da linha de produção, o custo de fabricação também foi reduzido, houve uma queda direta de 0,7%, tais resultados demonstram de forma objetiva o sucesso do trabalho de automatização.

Em geral os processos de rebarbação atuais ainda utilizam pouco a automatização, pois na maioria dos casos para automatizar operações de rebarbação são necessários investimentos para aquisição de novas máquinas, ou investimentos em dispositivos complexos, o trabalho apresentado mostra um exemplo bem sucedido da utilização racional dos recursos já existentes, com ganhos mútuos para a empresa, colaboradores, clientes e meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AÇOS VILLARES S.A, 1998. Disponível em: <<http://villares.com.br>>. Acesso em: 02 out. 2011.

AVILA, M. C; CHOI, J.; DORNFELD, David. **Deburring of Cross-Drilled Hole Intersections by Mechanized Cutting**. 2004. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/5d55v1d9#page-3>>. Acesso em: 09 out. 2011.

BENEDICT, G. F., **Nontraditional Manufacturing Processes**. New York. Marcel Dekker Inc, 1987.

BRU, Rodrigo. **Avaliação Mecânica de Superfícies do Aço SAE 4144**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2006. Disponível em: <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_071_RodrigoBru.pdf>. Acesso em: 02 out. 2011

CALLISTER, JR. Willian D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

Deutsches Institut für Normung – DIN 6794 . **Werkstückkanten** – Begriffe Zeichnungsangaben, Beuth Verlag, Berlin, 1982.

Deutsches Institut für Normung - DIN 8580. **Fertigungsverfahren**– Begriffe Einteilung, Beuth Verlag, Berlin, 2003.

Deutsches Institut für Normung - DIN 8590. **Fertigungsverfahren Abtragen** – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.

DINIZ, Anselmo. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Campinas: Artiber Editora, 2005.

DORNFELD, D. A., KIM, J., DECHOW, H., HEWSON, J., CHEN, L. J. **Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V**. CIRP Annals, vol. 48, no. 1, pp. 73-76, 1999.

EMAG. **ECM - Electro-Chemical Machining**, 2011. Disponível em: <<http://www.emag.com>>. Acesso em: 02 out. 2011.

EMMETI. **Conexão de Roscar**, 2011. Disponível em: <<http://www.emmeti.com.br>> Acesso em: 25 set. 2011.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Ed. Edgar Blucher Ltda., 1969.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Ed. Edgar Blucher Ltda., 1977.

GILLESPIE, L. K. **The Formation and Properties of Machining Burrs**. 130 f. Dissertação (Ms thesis). Utah State University, Logan, Utah, 2 microfichas, p&b, 1973.

GILLESPIE, L. K., BLOTTER, P.T. **Formation and Properties of Machining Burrs**. ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry, vol. 98, no. 1, pp. 66-74, 1976.

GILLESPIE, L. K. **Standard Terminology for Researchers of Burrs and Edge Finishing**. World-wide Burr Technology Committee WBTC STD-02, 1996.

GILLESPIE, L. K. **Your Burr Technology Efforts Changed the World**. 2006. Disponível em: <<http://www.larouxgillespie.com/burrhist.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2011.

HASHIMURA, M., UEDA, K., DORNFELD, D.A., MANABE, K. **Analysis of Three Dimensional Burr Formation in Oblique Cutting**. CIRP Annals, vol. 44, no.1, pp. 27-30, 1995.

JUVINALL, R. C; MARSHEK, K .M. **Projeto de Componentes de Máquinas, 4ª Ed.** LTC Editora, 2008.

KARL STORZ. **Borescopes**, 2011. Disponível em: <<http://www.karlstorzindustrial.com>>. Acesso em: 09 out. 2011.

KENNAMETAL. **ECM Deburring**, 2004. Disponível em: <<http://www.kennametal.com>>. Acesso em: 25 set. 2011

KENNAMETAL. **Diesel Applications**, 2011. Disponível em: <<http://www.kennametal.com>>. Acesso em: 25 set. 2011.

KIM, Jinsoo; DORNFELD, David. **Optimization and Control of Drilling Burr Formation of AISI 304L and AISI 4118 based on Drilling Burr Control Charts.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 41, no. 7, pp. 923-936, 2001.

KIM, Jinsoo; DORNFELD, David. **Development of an Analytical Model for Drilling Burr Formation in Ductile Materials.** 2002. Disponível em <<http://escholarship.org/uc/item/1cq5k23b#page-1>>. Acesso em: 02 out. 2011.

KO, S., DORNFELD, David. **A study on burr formation mechanisms**, ASME Transactions, Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 113, no. 1, pp. 75-87, 1991.

KONIG, W. **Remoção, Tecnologia de Fabricação Vol. 3.** 2006

KOZAK, J. **Electrochemical Machining.** 2004. Disponível em: <[http://www.home-machine-shop.com/Down Load/Electrochemical_Machining.pdf](http://www.home-machine-shop.com/Down_Load/Electrochemical_Machining.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2011.

LEE, K., STIRN, B., DORNFELD, D. A. **Burr Formation in Micro-machining Aluminum, 6061-T6**. Proceedings of the 10th International Conference Precision Engineering, Yokohama, Japan, pp. 47-51, 2001.

LINK, R. **Gratbildung und Strategien zur Gratreduzierung**. Ph.D. Dissertation, Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, 1992.

MARMENTINI, M., BELTRÃO, P. **Análise Comparativa do Desempenho de Brocas Helicoidais Revestidas com TIALN e ALCR na furação do Aço SAE 4144 Beneficiado**. Artigo (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, PPGEM, UTFPR, 2008. Disponível em: <<http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/012008178.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2011

MULLER, H., ARAÚJO, S. **Processos Não-Convencionais de Usinagem: Princípios Fundamentais e Análise Comparativa**. Centro de Tecnologia da UNICAMP (Universidade de Campinas), p33-61. 1972.

NAKAYAMA, K., ARAI, M. **Burr formation in metal cutting**. Annals of the CIRP, v.36/1, p.33-36. 1987.

RANGARAJAN, Arvind; DORNFELD, David. **Back Cutting and Tool Wear Influence on Burrs in Face Milling – Analysis and Solutions**. 2004. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/5bq7d5qg#page-1>>. Acesso em: 09 out. 2011.

SANGKEE, Min; DORNFELD, David. **Current Advanced Research Projects in Burr Formation and Deburring**. 2004. Disponível em: <www.amtonline.org/TechnologyandStandards/TechnologyReports/tech-ssessment-burr-formation-deburring>. Acesso em: 02 out. 2011.

SCHÄFER, F **“Gratbildung und Entgraten beim Umfangsstirnfräsen”**, VDI-Z 120, Nr. 1 / 2, 1978.

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA. 2003, Uberlândia. **Projeto e Construção de um Sistema de Controle**

Contra Curto-Circuito da Peça e da Ferramenta de Usinagem Eletroquímica, Uberlândia: UFU, 2003. Disponível em: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/13/artigos/TRB306.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2011.

SOUZA, André João. **Processos de Fabricação por Usinagem – Parte 1**. 2011. Faculdade de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf>. Acesso em: 25 set. 2011.

STAUFF. **High-Pressure Block Body Valves with Threaded Connections**, 2011. Disponível em: <<http://www.stauff.com>>. Acesso em: 02 out. 2011.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I e II**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

WOMACK, James T; JONES, Daniel T., ROOS, Daniel. **The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production, Capítulo 2**. Nova Iorque: Ed. HarperPerennial, 1991.

ZEISS. **Medição de forma, contornos e superfícies**, 2011. Disponível em: <www.zeiss.com.br>. Acesso em: 09 out. 2011.

GLOSSÁRIO

ECM – Electrochemical Machining – Tradução – Usinagem Eletroquímica

Lean Manufacturing – Tradução – Manufatura Enxuta, termo associado ao Sistema Toyota de Produção.

Know-how – Tradução – Ter o conhecimento, saber.

Breakout – Tradução – Quebra

CLP – Abreviação de Controlador Lógico Programável. É um computador especializado, baseado num microprocessador que desempenha funções de controle através de softwares desenvolvidos pelo usuário

bar – O bar é uma unidade de pressão (símbolo: bar) e equivale a exatamente 100 000 Pa (10^5 Pascal). Este valor de pressão é muito próximo ao da pressão atmosférica padrão, que é definido como 101.325 Pascal. O plural do nome da unidade de pressão bar é bars.

N – Abreviação de Newton. Unidade que mede força.