

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DINAMÔMETRO
PIEZELÉTRICO PARA OPERAÇÕES DE USINAGEM DE
TORNEAMENTO**

ATUSHI KURAMOTO

**SÃO PAULO
2006**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

note final 8,4
(sóto e que te)



**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DINAMÔMETRO
PIEZELÉTRICO PARA OPERAÇÕES DE USINAGEM DE
TORNEAMENTO**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção de
título de graduação em engenharia



ATUSHI KURAMOTO
ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO PAULO MARCICANO

SÃO PAULO
2006

11) *Acervo*
12) *Acervo*
13) *Acervo*

TF-06
K965 P

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600012474

1576332

A todos os professores e
funcionários da Politécnica que me
apoaram e possibilitaram a conclusão
deste trabalho.

ÍNDICE

RESUMO	1
1. INTRODUÇÃO	2
2. OBJETIVOS	4
3. INTRODUÇÃO TEÓRICA	5
3.1. TORNEAMENTO	5
3.2. FERRAMENTAS DE TORNEAMENTO	8
3.3. FORÇAS DE USINAGEM	15
3.4. EFEITO PIEZELÉTRICO	21
3.5. SENsoRES PIEZELÉTRICOS	23
3.6. DINAMÔMETROS	26
3.7. CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM DINAMÔMETRO	26
3.7.1. SENSIBILIDADE	26
3.7.2. RIGIDEZ	26
3.7.3. PRECISÃO E REPETIBILIDADE	27
3.7.4. ESTABILIDADE DIMENSIONAL	27
3.8. DINAMÔMETROS PIEZELÉTRICOS	27
4. PROTÓTIPO	30
4.1. PROJETO	30
4.1.1. PORTA-SENSOR	30
4.1.2. PORTA-FERRAMENTA	31
4.2. CONSTRUÇÃO	31
4.3. MONTAGEM	32
4.3.1. MONTAGEM DOS SENsoRES	32
4.3.2. MONTAGEM DO DINAMÔMETRO	32
5. TESTES E ANÁLISES	34
5.1. FREQUÊNCIA NATURAL	34
5.2. AMORTECIMENTO	35
5.3. LINEARIDADE	35
5.4. SENSIBILIDADE	36
6. CONCLUSÕES	39
7. BIBLIOGRAFIA	40
APÊNDICE	41

Resumo

Durante operações de usinagem, determinar e monitorar os esforços de corte podem fornecer dados valiosos a respeito do desgaste da ferramenta, de fenômenos presentes na interface ferramenta/peça e, até mesmo, sobre a viabilidade do processo.

Apesar de ser possível se determinar os valores dos esforços de corte por meio de fórmulas (ASME, AWF, Kienzle, Kronenberg) ou simulá-los por meio de modelagem (Elementos Finitos), tais procedimentos nos fornecem apenas estimativas sobre o real valor ou comportamento das forças implicadas ao processo, sendo valores estáticos, inadequados para muitas aplicações de um fenômeno inherentemente dinâmico e complexo como a usinagem.

Medições diretas, por outro lado, são capazes de fornecer dados altamente precisos e em tempo real.

Neste contexto insere-se o tema deste trabalho, ou seja, a construção de um dinamômetro para a medição dinâmica dos esforços de corte em uma operação de usinagem (torneamento).

Por se tratar de um protótipo, o dinamômetro foi projetado para operar em regime de baixas solicitações, sendo construído em torno de sensores piezelétricos por sua alta capacidade de responder a carregamentos dinâmicos.

A sensibilidade obtida em testes foi de 27,17mV/kgf para a força de corte e de 26,09mV/kgf e 25,74mV/kgf, respectivamente, para as forças de avanço e penetração. O protótipo apresentou linearidade (coeficiente de correlação: 0,9852) sob condições reais de usinagem (torneamento).

1. Introdução

Há anos tem sido visto o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias aos processos de fabricação, produzindo máquinas cada vez mais eficientes, precisas, complexas e caras. Na vanguarda deste processo encontram-se exigências crescentemente rigorosas, obrigando, muitas vezes, a utilização de insumos/matérias-primas e, principalmente, ferramentas de novos materiais, não raros, caros.

Neste cenário não é difícil perceber a ascensão dos custos de produção, tornando inadmissível o desperdício com produtos defeituosos. O mesmo raciocínio pode ser aplicado a um chão de fábrica comum, onde apesar dos insumos não terem preços tão elevados, o desperdício com produtos defeituosos aumentam os custos de produção, podendo comprometer a produtividade e até mesmo inviabilizar a atividade fabril.

Portanto, há a necessidade de otimização do processo de fabricação.

Em operações de usinagem, por exemplo, isso pode ser obtido por meio do monitoramento dos esforços de corte, permitindo uma melhor estimativa para a troca da ferramenta, evitando sua subutilização devido a uma troca prematura, a perda de peças devido a trocas tardias e, em casos extremos, danos à máquina devido à ruptura da ferramenta, o que paralisaria a produção.

Há duas abordagens possíveis para a determinação dos esforços de corte: a medição direta (protótipo/dinamômetro) e a modelagem (método computacional).

A vantagem da medição direta reside no fato de que certos fenômenos existentes na interface ferramenta/peça, como a formação de cavaco, só poderem ser verificados empiricamente, com a realização de testes em

condições reais de usinagem. Entretanto, o projeto e desenvolvimento de um protótipo, além da realização de testes, consomem uma parcela significativa de tempo.

A modelagem, normalmente, é mais simples, rápida e barata de ser implementada, possuindo a capacidade de detectar falhas no projeto durante o desenvolvimento do modelo, além de fornecer dados visuais preciosos sobre os esforços atuantes na estrutura do protótipo. Entretanto, a modelagem depende de dados fornecidos por medições diretas para simular certos fenômenos dinâmicos presentes em operações de usinagem, sendo, não raro, incapaz de modelar algum deles.

Logo, é importante não considerar a medição e a modelagem como métodos diferenciados para se abordar o problema da determinação dos esforços de corte, mas sim como métodos complementares.

Este trabalho focará o método da medição com o projeto e construção de um protótipo. Paralelamente, em outro trabalho, foi implementada a solução de modelagem por meio do Método de Elementos Finitos (ANSYS).

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste no projeto e fabricação de um protótipo de dinamômetro para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento. O protótipo será desenvolvido com sensores piezelétricos, que fornecerão os sinais necessários para a análise e determinação destas forças.

3. Introdução teórica

3.1. Torneamento

O processo que se baseia na retirada de material pela ação de uma ferramenta sobre uma peça girando em torno de seu próprio eixo chama-se torneamento. O torneamento é uma operação de usinagem (o termo usinagem compreende todo processo mecânico onde a peça é o resultado de um processo de remoção de material) que permite trabalhar peças cilíndricas movidas por um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo.

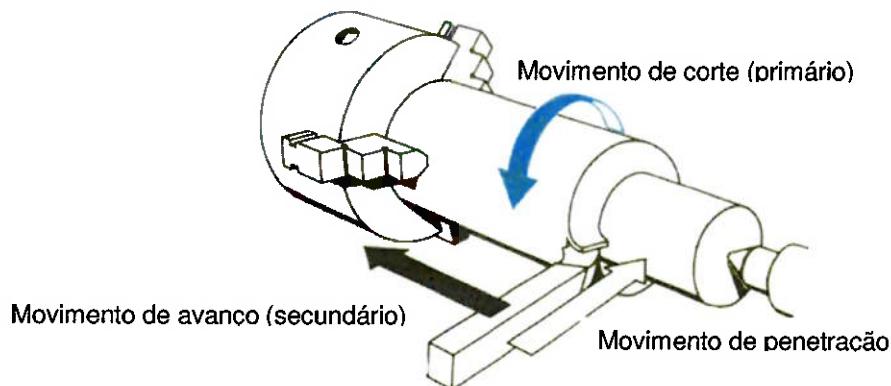


Figura 1 – Operação de torneamento. Notar os movimentos de rotação e de avanço da peça e o movimento de penetração da ferramenta, Adaptado de [7].

O torneamento, como todos os trabalhos executados com máquinas-ferramenta, ocorre mediante a retirada progressiva do cavaco da peça trabalhada. O cavaco é cortado por uma ferramenta de um só gume, que deve ter dureza superior à do material da peça.

No torneamento (ver figura 1), a ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo ao redor de seu eixo permite o corte contínuo e regular do material. A força necessária para retirar o cavaco é feita sobre a peça, enquanto a ferramenta, firmemente presa ao porta-ferramenta, contrabalança a reação dessa força.

Para realizar o torneamento, são necessários três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta (ver figura 1):

- Movimento de corte/primário - Movimento principal que permite cortar o material. O movimento é rotativo e realizado pela peça.
- Movimento de avanço/secundário - Movimento que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça (paralelo ao eixo de rotação).
- Movimento de penetração - Movimento que determina a profundidade de corte, regulando a profundidade do passe e a espessura do cavaco.

Como pode ser visto pela figura 2, variando os movimentos, a posição e o formato da ferramenta, é possível realizar uma grande variedade de operações:

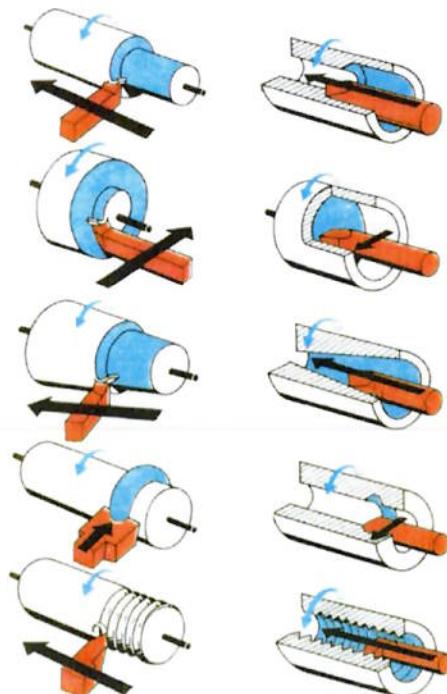
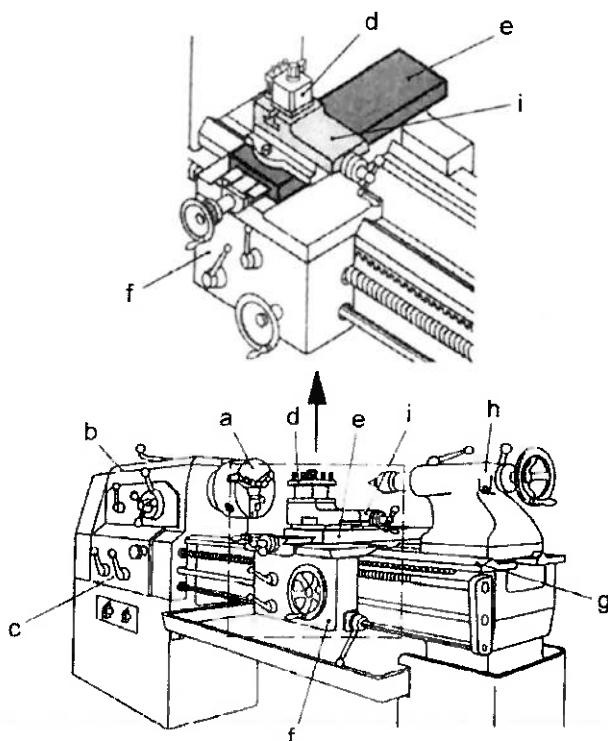


Figura 2 - Torneamento. Notar os diferentes tipos de ferramentas e movimentos necessários para a obtenção de geometrias de peça diferentes. Adaptado de [7].

As máquinas utilizadas para o torneamento são denominadas tornos (ver figura 3). Atualmente seu desenvolvimento tem permitido a obtenção de peças com acabamento superficial e controle dimensional anteriormente obtidos somente por processos de retificação/acabamento. A utilização de equipamentos programáveis tem permitido a produção em série com elevados níveis de qualidade, além de permitir a flexibilização da produção. As máquinas mais avançadas têm conseguido atingir valores de velocidade de corte próximos a 1000 m/min sem fluido de corte.



- | | |
|----------------------------|----------------------|
| a - placa | f - carro principal |
| b - cabeçote fixo | g - barramento |
| c - caixa de engrenagens | h - cabeçote móvel |
| d - torre porta-ferramenta | i - porta-ferramenta |
| e - carro transversal | |

Figura 3 - Torno. Adaptado de [7].

3.2. Ferramentas de torneamento

Juntamente com os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), a geometria da ferramenta é um dos fatores de maior influência no torneamento.

Obs. Parâmetros de corte:

- Velocidade de corte – taxa em que a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta.
- Avanço – é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça.
- Profundidade de corte – é a espessura (profundidade) de penetração da ferramenta.

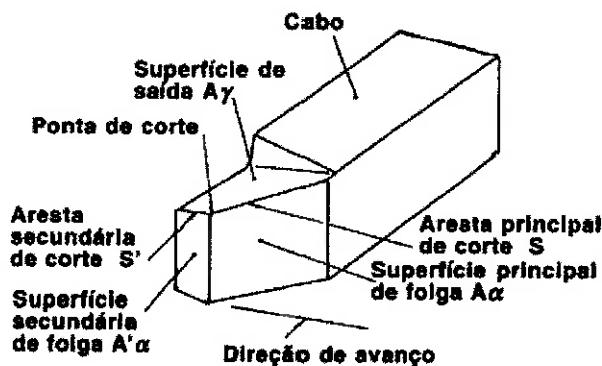


Figura 4 - Ferramenta de corte. Adaptado de [7].

Uma ferramenta de corte para torneamento é composta por (figura 4):

- Superfície de saída – Superfície da ferramenta sobre a qual o cavaco desliza após o corte.

- Superfície de folga – Superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem principal.
- Superfície secundária de folga – Superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem secundária.
- Cunha de corte – É a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga sobre a qual ocorre o corte do metal.
- Arestras de corte – São as arestras da cunha de corte onde se localiza a interface ferramenta/peça, distinguindo-se como:
 - Aresta principal de corte – Formada pela intersecção das superfícies de saída e folga.
 - Aresta secundária de corte – Formada pela intersecção das superfícies de saída e secundária de folga.
- Ponta de corte – Local da cunha de corte onde se encontram a aresta principal e a aresta secundária de corte.

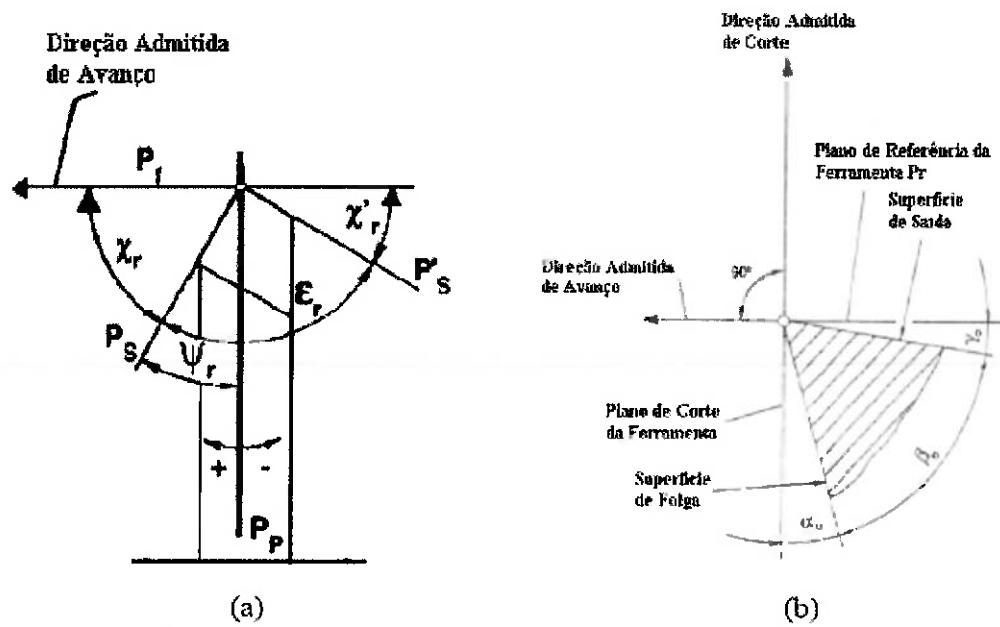


Figura 5 - Ângulos da ferramenta de corte medidos no plano de referência da ferramenta (a) e no plano ortogonal (b). Adaptado de [7].

Os ângulos referentes à ferramenta e a posição desta em relação à peça (figura 5) são medidos em diferentes planos de referência. No torneamento, os ângulos mais influentes são:

- Ângulo de posição da ferramenta - χ_r (plano de referência)
- Ângulo de posição secundário da ferramenta - χ' , (plano de referência)
- Ângulo de ponta da ferramenta - ε_r (plano de referência - P_r)
- Ângulo de inclinação da ferramenta - λ_s (plano de corte - P_s)
- Ângulo de saída da ferramenta - γ_0 (plano ortogonal - P_0)
- Ângulo de folga - α_0 (plano ortogonal - P_0)

As ferramentas para torneamento sofreram um processo evolutivo ao longo do tempo. A demanda da produção, cada vez mais acelerada, e o surgimento de novos materiais forçaram à procura por ferramentas mais duráveis e eficientes. Os primeiros passos de pesquisa passaram pela procura das melhores geometrias para a operação de corte, seguindo-se à busca de materiais de melhores características de resistência e durabilidade. Finalmente passou-se a combinar materiais em novos modelos construtivos sincronizando as necessidades de desempenho, custos e redução dos tempos de parada no processo produtivo. Como resultado desta evolução consagrou-se o uso de ferramentas compostas, onde o elemento de corte é uma pastilha montado sobre uma base, concluindo a evolução dos primeiros cincéis utilizados nas operações manuais até as pastilhas cerâmicas de alta resistência.

Como pode ser verificado pela figura 6, o maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está no equilíbrio entre a capacidade de corte/penetração (dureza) e a capacidade de cortar/penetrar sem se romper

(tenacidade). Atualmente, as melhores combinações são obtidas com ferramentas revestidas e compostas, formadas por material base (tenacidade) e revestimento/pastilha (dureza).

-
1. Aço Carbono
 - Comum
 - com elementos de liga (V, Cr)
2. Aço Semi-Rápido (Baixo W)
3. Aço Rápido (Podem ser fundidos ou fabricadas pela Metalurgia do Pó)
 - sem revestimento
 - com revestimento
4. Aço Super-Rápido (Elevado teor de V)
5. Ligas Fundidas
6. Metal Duro (Podem ser com ou sem revestimento)
 Classes:
 - P
 - M
 - K
7. Cermets (Podem ser com ou sem revestimento)
8. Cerâmicas
 - Com e ser revestimento
 - A base de Si_3N_4
 - A base de Al_2O_3 SIALON
 - Pura
 - com adições
 - ZrO_2 (branca)
 - TiC (preta ou mista)
 - SiC (whiskers)
9. Ultraduros
 - CBN – PCBN
 - PCD
10. Diamante Natural

Figura 6 - Materiais para ferramenta de corte. Notar o conflito entre tenacidade e dureza.
Adaptado de [7].

Além disso, o material da ferramenta deve ter elevada resistência ao desgaste e à abrasão, fenômenos comuns e extremamente agressivos no contato ferramenta/peça. Deve resistir a choques térmicos, manter suas propriedades a temperaturas elevadas e, sobretudo, não reagir com o material da peça (estabilidade química).

No contexto histórico, dois materiais se destacam, apesar de não serem os mais eficientes ou os mais desenvolvidos tecnologicamente: o aço rápido e os metais duros. Sua importância se deve ao fato de, na época de seus respectivos desenvolvimentos, terem permitido um aumento na velocidade de corte de uma ordem de grandeza se comparados com os materiais até então existentes. Quando foram desenvolvidos os aços rápidos, as velocidades de corte foram aumentadas de aproximadamente 3m/min para cerca de 35m/min e após o desenvolvimento do metal duro para cerca de 300m/min.

Há dois critérios para a substituição da ferramenta: a troca por avarias (lascamento, trincamento ou quebra) e a troca por desgaste excessivo.

Em torneamento (operação de corte contínuo) é mais comum a ocorrência de desgaste excessivo, sendo a ocorrência de avarias extremamente raras, sendo limitados a casos de defeitos de fabricação da ferramenta ou sobrecarga sobre a ferramenta.

Há três tipos de desgaste de ferramenta:

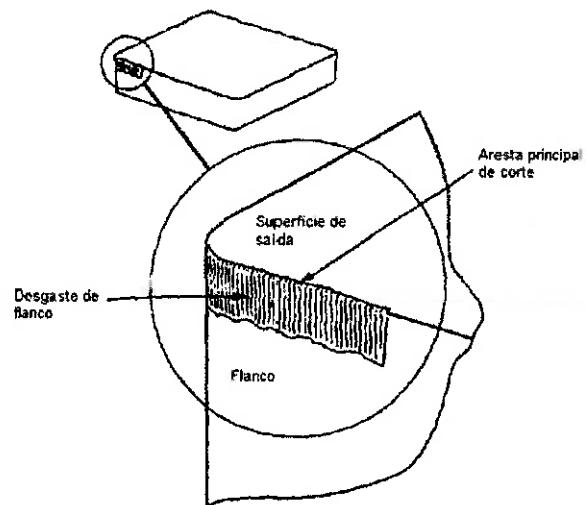


Figura 7 - Desgaste de flanco. Adaptado de [7].

- Desgaste de flanco (figura 7) – Ocorre nas superfícies de folga, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária. Quando a aresta principal de corte é afetada, há um aumento na magnitude da temperatura e das forças envolvidas, podendo causar vibrações na ferramenta, na peça ou em ambas. No caso da aresta secundária de corte, da qual dependem o controle dimensional e a qualidade do acabamento superficial da peça, um desgaste excessivo resulta em uma superfície mal acabada e peças fora de especificação. Em condições normais de usinagem, o desgaste de flanco é o tipo de falha que apresenta os maiores riscos de danos à peça e que exige maior potência de corte, motivo pelo qual costuma ser o mais usado na determinação de critérios de fim de vida da ferramenta.

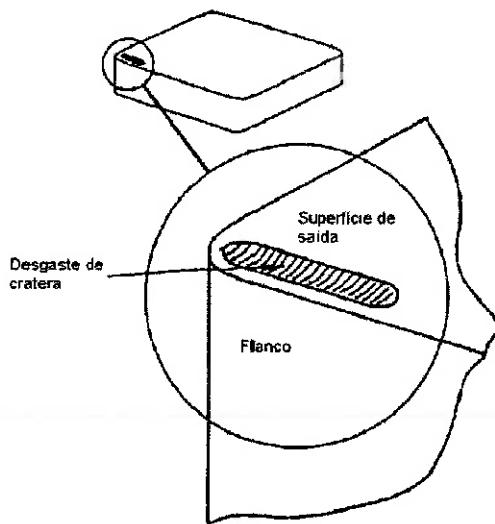


Figura 8 - Desgaste de cratera. Adaptado de [7].

- Desgaste de cratera (figura 8) – Ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza a zona de deslizamento do cavaco. Este

Este tipo de desgaste resulta de uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão. Quando submetido a altas velocidades de corte, temperaturas elevadas são geradas, favorecendo o mecanismo de desgaste por difusão. A difusão causa a redução da resistência à abrasão, estimulando o desgaste abrasivo. Assim, a forma de cratera alongada com extremidades arredondadas paralela à aresta de corte do desgaste, é resultado da distribuição de tensões da superfície de saída da ferramenta.

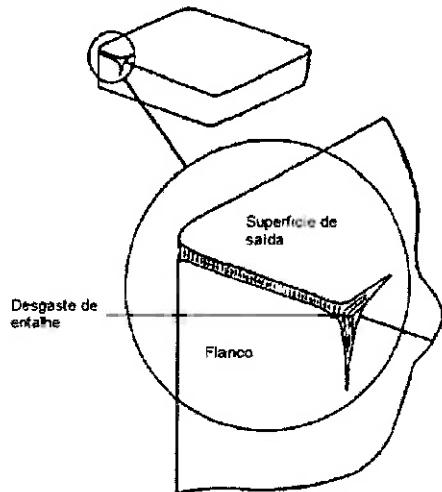


Figura 9 - Desgaste de entalhe. Adaptado de [7].

- Desgaste de entalhe (figura 9) – Ocorre quando o desgaste de flanco é mais pronunciado na região de contato com a superfície externa da peça. Apesar de nem sempre afetar o processo de corte, o desgaste de entalhe pode ser bastante prejudicial, pois o entalhe costuma ser relativamente profundo, constituindo uma região de concentração de tensões, podendo levar à ruptura da ferramenta.

Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos

desnecessários com operação inadequada, que se determine a vida útil da ferramenta.

A norma ISO3685 estabelece ensaios para determinar o “tempo de vida da ferramenta de corte”, ou seja, o tempo de trabalho da ferramenta necessário para o desenvolvimento de um defeito crítico.

Segundo a norma, os critérios que devem ser adotados para ferramentas de metal duro são:

- Desgaste de flanco médio – 0,3mm
- Desgaste de flanco máximo – 0,6mm (caso o desgaste não ocorra de forma regular ao longo do flanco).
- Profundidade da cratera – $0,06+03f$, onde “f” representa o avanço.
- Distância frontal entre cratera e flanco – 0,02mm
- Falha catastrófica

Para ferramentas de aço rápido e de cerâmica, os critérios mais comuns são relativos ao desgaste de flanco médio e máximo, cujos valores são os mesmos para ferramentas de metal duro.

A norma recomenda a reafiação ou substituição da ferramenta ao atingir qualquer um desses limites.

3.3. Forças de usinagem

A força de usinagem é definida como o esforço total que atua sobre a superfície da ferramenta sob ação da peça de trabalho. Esta força é normalmente apresentada com base em suas componentes normalizadas. Segundo as normas DIN 6584 e ISO 3002-4, tais componentes são decomposições da força total que atuam sobre a cunha cortante no sentido tangencial no contato ferramenta/piece (força de corte), no sentido longitudinal

da peça (força de avanço) e no sentido transversal ou radial da peça (força de penetração) formando ângulos retos entre cada par observado (figura 10).

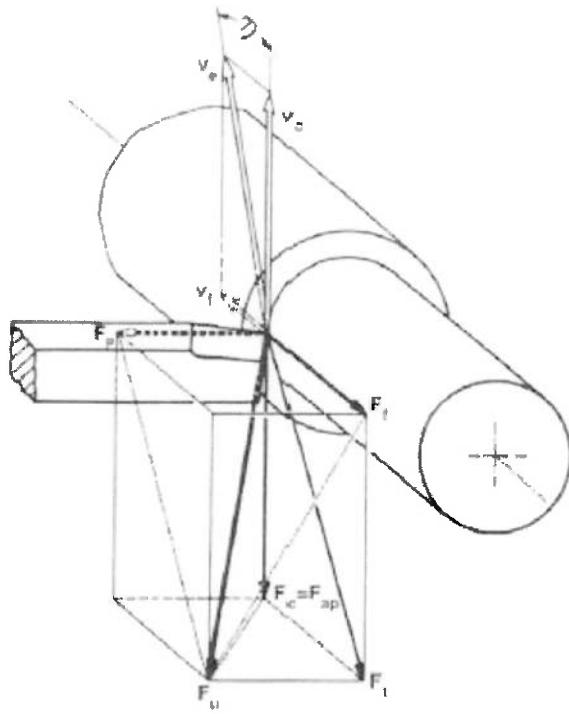


Figura 10 - Forças de Usinagem. Adaptado de [1].

Assim (figura 10):

- Força de corte (F_c) – Consiste na componente orientada com base na direção de corte (direção dada pela velocidade de corte). No processo de torneamento atua tangencialmente à peça. O produto desta componente pela velocidade de corte resulta em um valor de potência que representa mais de 90% da potência exigida durante a usinagem.
- Força de avanço (F_f) – Consiste na projeção da força de usinagem na direção de avanço da ferramenta.

- Força de penetração (F_p) – Consiste na projeção da força de usinagem na direção ortogonal ao plano de trabalho (definido pelas direções de corte e de avanço; as componentes atuantes no plano de trabalho, força de corte e de avanço, compõem a força ativa).

Obs. Todas as componentes imprimem esforços compressivos sobre as superfícies da ferramenta. Entretanto devido às elevadas pressões na região de contato ferramenta/piece e ao coeficiente de atrito, há tensões de cisalhamento combinadas aos esforços compressivos.

Dentre os fatores que mais afetam a força de usinagem temos os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte), a ferramenta e o material da peça.

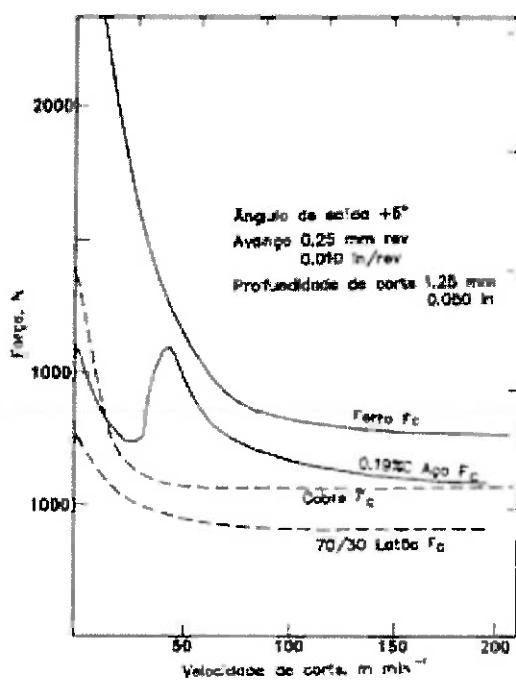


Figura 11 - Influência da velocidade de corte na força de corte. Adaptado de [1].

- Velocidade de corte - De modo geral, as forças de avanço e penetração decrescem com o aumento da velocidade de corte. A força de corte também, mas se estabiliza ao atingir valores de velocidade de corte próximos a 100m/min. Entretanto, para determinados tipos de ferramenta, o cavaco de certos metais tende a aderir a sua superfície a velocidades próximas de 50m/min, causando o fenômeno conhecido como "aresta postiça de corte". Nestes metais, há a ocorrência de uma pequena faixa de súbito aumento da força de corte (pico – ver figura 11) que logo se extingue tão logo a "aresta postiça de corte" desapareça, ou seja, quando a velocidade de corte atinge valores superiores a 60m/min, aproximadamente.

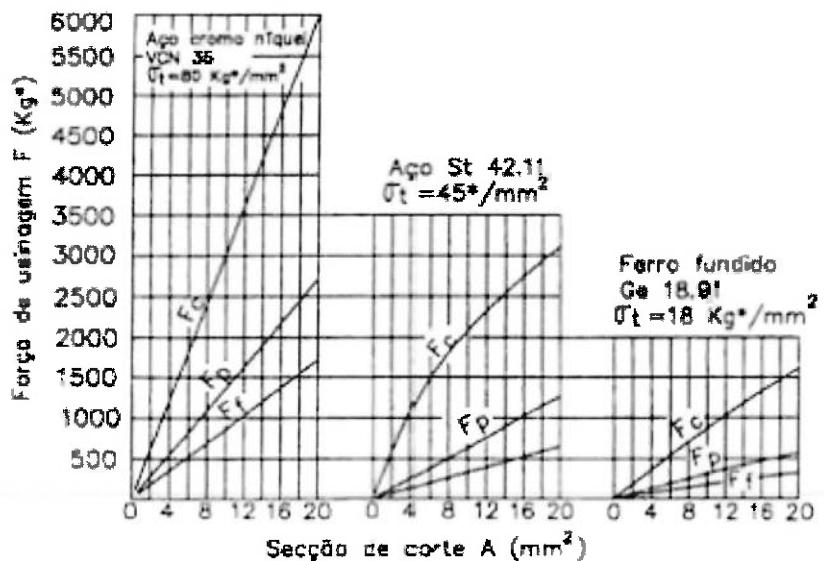


Figura 12 - Influência da seção de corte nas forças de usinagem. Adaptado de [1].

- Seção de corte – O aumento da seção de corte (aumento do avanço ou da profundidade ou ambos) leva, invariavelmente, ao aumento da força de usinagem e de cada uma de suas componentes (figura 12).

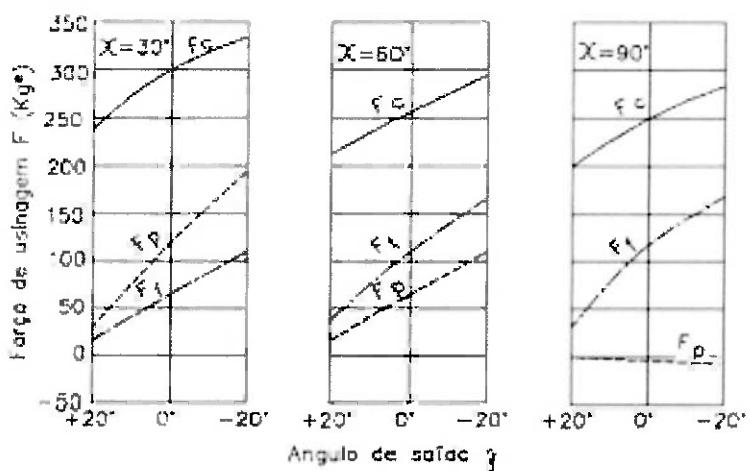


Figura 13 - Influência dos ângulos da ferramenta nas componentes da força de usinagem.
Adaptado de [1].

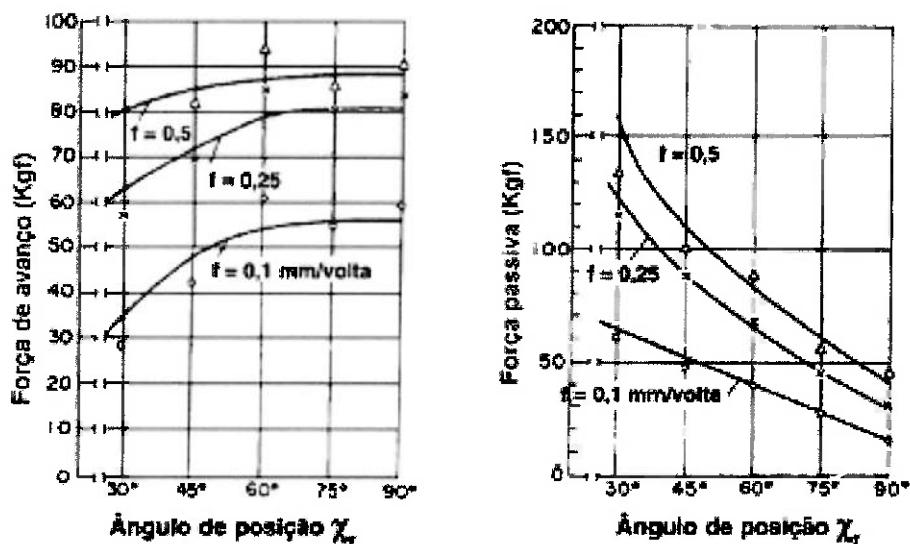


Figura 14 - Influência do ângulo de posição nas forças de avanço e passiva (penetração).
Adaptado de [1].

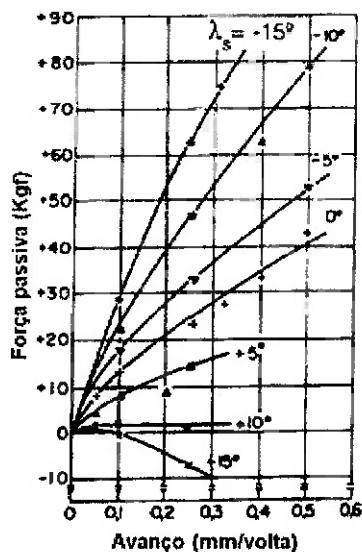


Figura 15 - Influência do ângulo de inclinação na força passiva (penetração). Adaptado de [1].

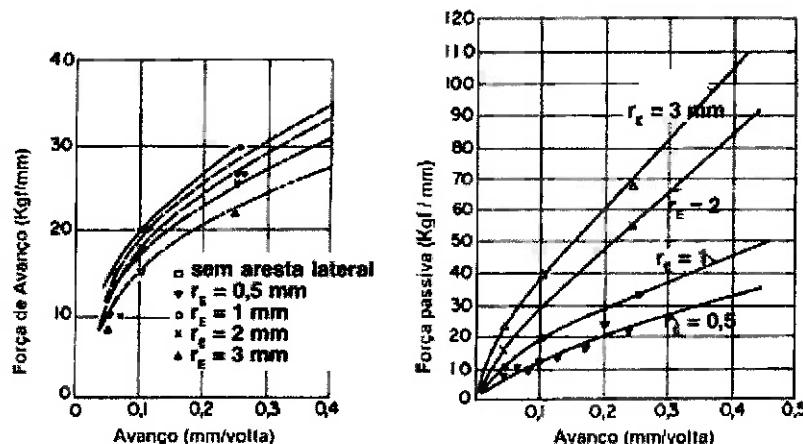


Figura 16 - Influência do raio da ponta da ferramenta nas forças de avanço e passiva. Adaptado de [1].

- Geometria da ferramenta – Para a força de corte, o ângulo de saída é o parâmetro geométrico mais influente. Seu aumento acarreta a diminuição da força de corte devido à menor deformação do cavaco (figura 13). Entretanto, aumentar o ângulo de saída resulta na fragilização da ferramenta devido à redução de sua seção resistente.

Para as forças de avanço e penetração, os parâmetros geométricos mais importantes são os ângulos de posição (figura 14) e inclinação (figura 15) e o raio da ponta da ferramenta (figura 16).

- Desgaste da ferramenta – O desgaste da ferramenta causa, devido ao aumento da área de contato cavaco/ferramenta, o aumento do atrito, resultando no aumento da força de corte.
- Material da peça – De forma geral, como o corte dos metais depende da deformação plástica e ruptura por cisalhamento, quanto maior a resistência do material maior a força de corte. Entretanto, fatores como acabamento superficial e a adição de certos elementos de liga podem reduzir a força de corte.

3.4. Efeito piezelétrico

Descoberto em 1880 pelos irmãos Jacques e Pierre Curie, o efeito piezelétrico consiste na polarização elétrica, em certos tipos de cristais (inicialmente quartzo e sal de Rochelle), quando submetidos à deformação mecânica (do grego “piezin” = pressionar).

Materiais piezelétricos geram campo elétrico quando deformados mecanicamente (sensores) e sofrem alterações em suas dimensões quando submetidos a campo elétrico (atuadores).

Tem como característica essencial, para sua aplicação prática, uma grande relação linear entre o campo elétrico aplicado/produzido e a deformação mecânica produzida/aplicada.

O efeito piezelétrico aparece espontaneamente em cristais naturais que não apresentam centro de simetria, como o quartzo, a turmalina, a calcita, a pirita, entre outros.

Materiais cerâmicos como o titanato de bário (BaTiO_3), o titanato zirconato de chumbo (PZT) e o metaniobato de chumbo (PMN), entre outros, também podem apresentar propriedades piezelétricas quando submetidos a um processo de polarização elétrica, muito semelhante ao utilizado na produção de imãs artificiais (AlNiCo, por exemplo).

O PVDF, um polímero a base de polifluoreto vinilideno, também apresenta propriedades piezelétricas quando polarizado.

A polarização elétrica é realizada alinhando-se os dipolos elétricos desses materiais, que estão aleatoriamente orientados quando em estado bruto, por meio da aplicação de um campo elétrico superior a 2 kV/mm. Para evitar centelhamento, a amostra é imersa em um meio dielétrico a cerca de 90°C.

Com os dipolos elétricos do material alinhados com o campo elétrico aplicado a polarização é concluída. Retira-se o campo e resfria-se a amostra (choque térmico) com o intuito de preservar o alinhamento.

Como consequência da polarização, há, ainda, uma distorção que causa um pequeno alongamento do material na direção do alinhamento e uma contração ao longo do eixo normal à direção do campo elétrico aplicado.

Por analogia ao fenômeno de polarização magnética dos materiais ferrosos, os materiais em que a piezeletricidade pode ser induzida pela polarização elétrica são chamados de *ferrelétricos*.

A polarização de uma cerâmica piezelétrica é residual e se degrada através de excesso de utilização do material ou utilização próxima aos limites elétricos ou térmicos (temperatura de Curie).

Obs. A temperatura de Curie (TC) marca o limite de transição entre fases. Se o material piezelétrico está a uma temperatura abaixo da temperatura de Curie, ele permanece com os dipolos elétricos orientados. Se a temperatura do material piezelétrico ultrapassa a temperatura de Curie, há um desalinhamento dos dipolos elétricos e o material sofre degradação ou perda de suas propriedades piezelétricas.

3.5. Sensores piezelétricos

Um sensor é um dispositivo que recebe um sinal ou estímulo, convertendo-o em sinais elétricos.

O termo não deve ser confundido com transdutor, pois este converte um tipo de energia em outro, enquanto que um sensor, conforme definição acima, converte qualquer tipo de energia em energia elétrica.

O sinal de saída de um sensor pode apresentar-se na forma de diferença de potencial, corrente ou carga elétrica, podendo ainda ser descritas em termos de amplitude, freqüência ou fase. Tal conjunto de características é designado como formato do sinal de saída.

Sensores piezelétricos convertem deformação mecânica sofrida em sinais elétricos. São materiais muito rígidos com elevado limite de carga (conforme figura 17), registram deformações da ordem de centésimos de milímetros, apresentando comportamento linear sob uma ampla faixa de

carregamentos (sensibilidade). São bastante imunes a ruídos e detentores de uma elevada freqüência natural. Apresentam boa resolução (menor incremento mensurável em determinada medida) sob diferentes carregamentos (conforme figura 18). Por serem pequenos, leves e capazes de apresentarem-se na forma de filmes (PZT), são adequados a processos de miniaturização (incorporação a máquinas e dispositivos). São bastante estáveis a temperaturas elevadas e relativamente frágeis (principalmente ao impacto). Suportam elevadas freqüências de operação (conforme figura 19), possuindo baixo tempo de resposta, tornando-os adequados à medição de eventos dinâmicos e instantâneos (choques). Não são capazes de efetuar medidas estáticas. O típico limite inferior para sensores piezelétricos abrange a faixa de 0,0003Hz a 0,01Hz.

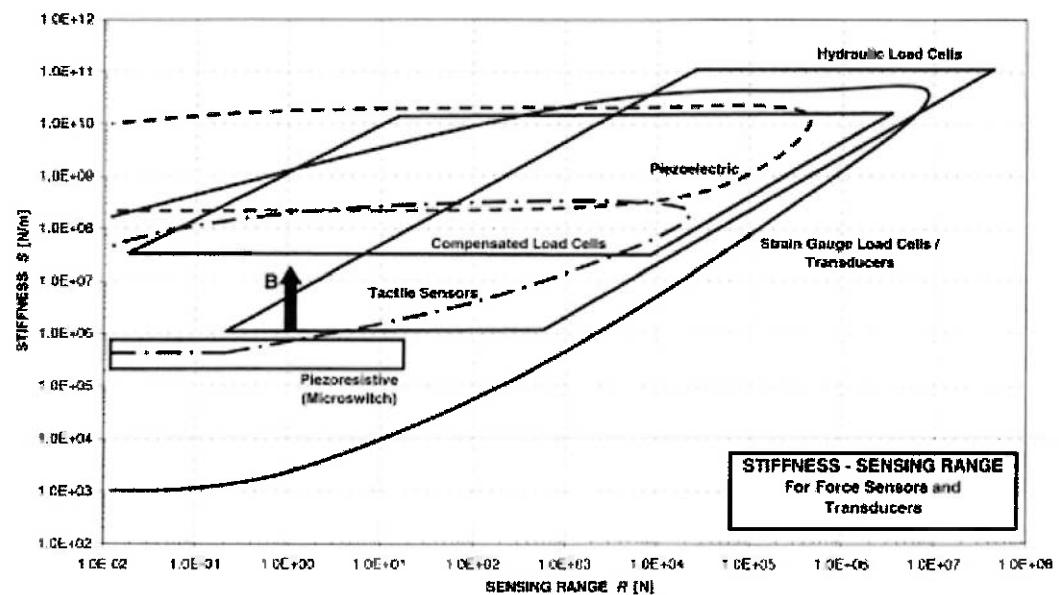


Figura 17 - Gráfico de Rigidez. Adaptado de [3].

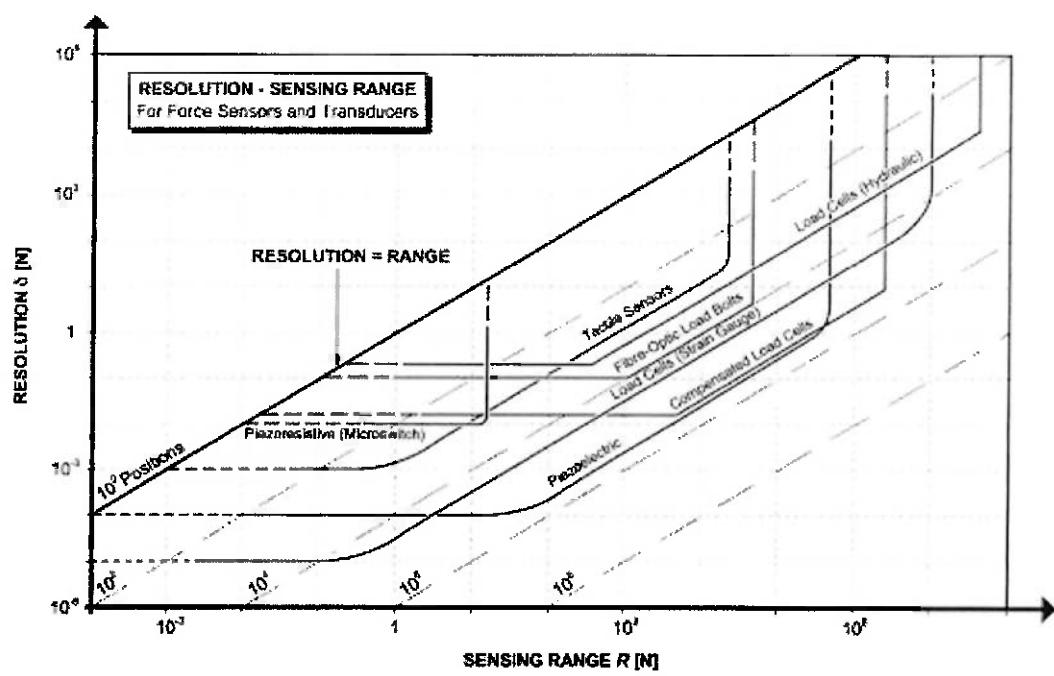


Figura 18 - Gráfico de Resolução. Adaptado de [3].

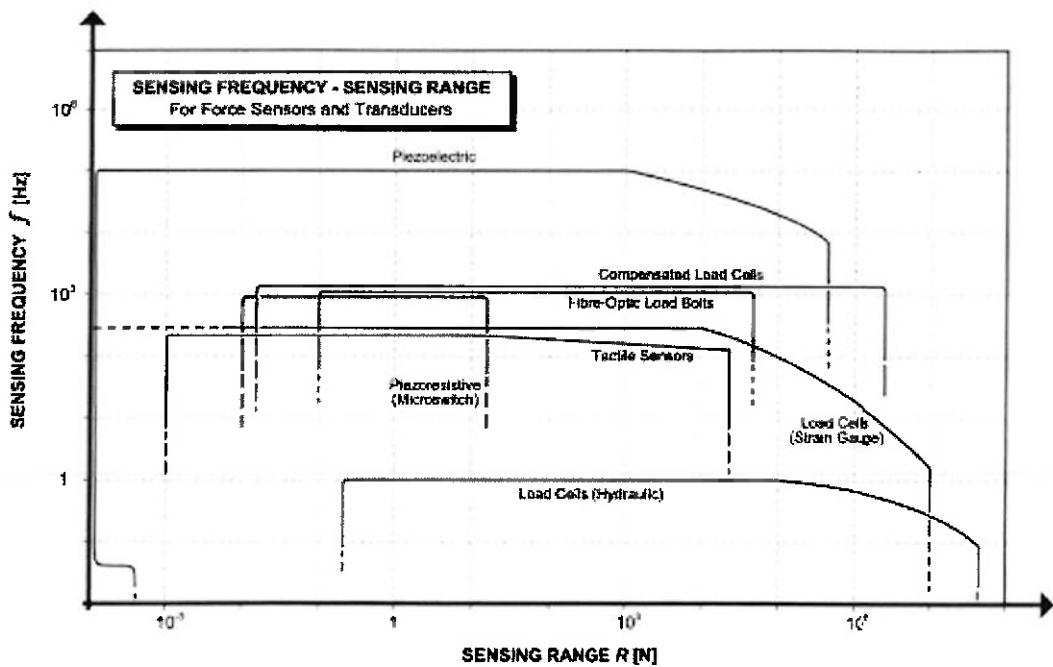


Figura 19 - Gráfico de Freqüência de Operação. Adaptado de [3].

3.6. Dinamômetros

O dinamômetro é um instrumento utilizado para medir forças.

Historicamente, a primeira utilização de um dinamômetro para medição de esforços de usinagem em torneamento data de 1882, com a utilização de modelos rudimentares baseados em contrapesos. O primeiro dinamômetro para a medição das componentes das forças de usinagem data de 1904 e utilizava um sistema hidráulico, inadequado devido à baixa rigidez. Houve, também, a utilização de sistemas pneumáticos, igualmente inadequados. Outros modelos utilizaram relógios comparadores que apesar de simples, não eram capazes de realizar medições dinâmicas da força de usinagem.

Atualmente, os modelos de dinamômetros mais comuns utilizados na medição de esforços de usinagem são os baseados em extensômetros elétricos (“strain gauges”) e sensores piezelétricos.

3.7. Características gerais de um dinamômetro

3.7.1. Sensibilidade

Fornece a relação entre a grandeza lida pelo observador (saída do sensor) e a grandeza que se deseja determinar (entrada do sensor), sendo desejável que assuma um comportamento linear na faixa de trabalho.

3.7.2. Rigidez

Tal característica relaciona-se diretamente ao princípio de que o instrumento não deve influenciar a medição, ou seja, o sistema deve ser minimamente afetado pela presença do sensor. Assim, ao se utilizar um porta-ferramenta instrumentado como sistema de medição de forças de usinagem,

deve-se garantir que a deformação do sensor não seja excessiva a ponto de prejudicar o posicionamento da ferramenta no contato com a peça. Para verificar a rigidez dinâmica do dinamômetro deve-se determinar sua freqüência natural de vibração, sendo desejável que apresente valores elevados.

3.7.3. Precisão e repetibilidade

O projeto do sensor será considerado satisfatório se as medidas fornecidas pelo sistema se aproximarem dos valores reais de força (sistema de medição preciso), sendo essencial a posterior fase de calibração. Além disso, o sistema poderá ser utilizado em ensaios apenas se apresentar resultados coerentes após vários ensaios idênticos (repetibilidade).

3.7.4. Estabilidade dimensional

Dilatações devido à variação de temperatura podem afetar a medição. Dependendo da duração do ensaio, a transferência de calor ao sensor pode causar deformações consideráveis, exigindo medidas de compensação da variação de temperatura.

3.8. Dinamômetros piezelétricos

Dinamômetros piezelétricos permitem a transformação direta do carregamento atuante sobre os sensores em sinais elétricos. As cargas elétricas são diretamente proporcionais à variação do carregamento, eliminando a necessidade de “ajuste zero”.

O sensor piezelétrico, normalmente, é instalado entre duas superfícies, permitindo que todo esforço realizado sobre o sistema seja transferido,

ocasionando a geração do sinal elétrico pelo sensor. Como materiais piezelétricos respondem apenas a esforços aplicados paralelamente à orientação de seus dipolos, para a medição de forças multicomponentes, é necessário o arranjo dos sensores, permitindo que cada um deles responda, independentemente, a cada componente do esforço.

No caso de esforços de usinagem no torneamento, será necessário um conjunto de três sensores, sendo dois para a medição dos esforços tangenciais (força de corte e de avanço) e um para o esforço normal (força de penetração).

Dinamômetros piezelétricos também são capazes, em certos casos, de monitorar o comportamento dinâmico de uma máquina, detectando vibrações excessivas.

Tal fato associado à capacidade de medir forças em operações de usinagem possibilita o desenvolvimento de sistemas de monitoramento “on-line” baseado em sensores piezelétricos, correlacionando o desgaste da ferramenta com o comportamento das componentes da força de usinagem e com o comportamento vibracional do sistema.

Métodos “on-line” permitem a automação do processo de troca da ferramenta, otimizando a sua utilização e reduzindo o tempo de parada da máquina, resultando em ganhos de produtividade.

Características gerais de um dinamômetro piezelétrico:

- Elevada rigidez
- Elevada freqüência natural
- Ampla faixa de operação (“range”)
- Sensibilidade linear
- Livre de histerese

- Simplicidade
- Dimensões reduzidas

4. Protótipo

4.1. Projeto

O protótipo é constituído por duas partes: o porta-ferramenta e o porta-sensor. Ambos são usinados em alumínio devido à disponibilidade do material na oficina e à facilidade de usinagem.

4.1.1. Porta-sensor

Tem como função a acomodação do conjunto de três sensores piezelétricos (um para cada componente da força de corte) do dinamômetro. Possui uma saliência destinada a fixar o conjunto à torre do torno e três furos passantes para a fixação simultânea dos sensores e do porta-ferramenta.

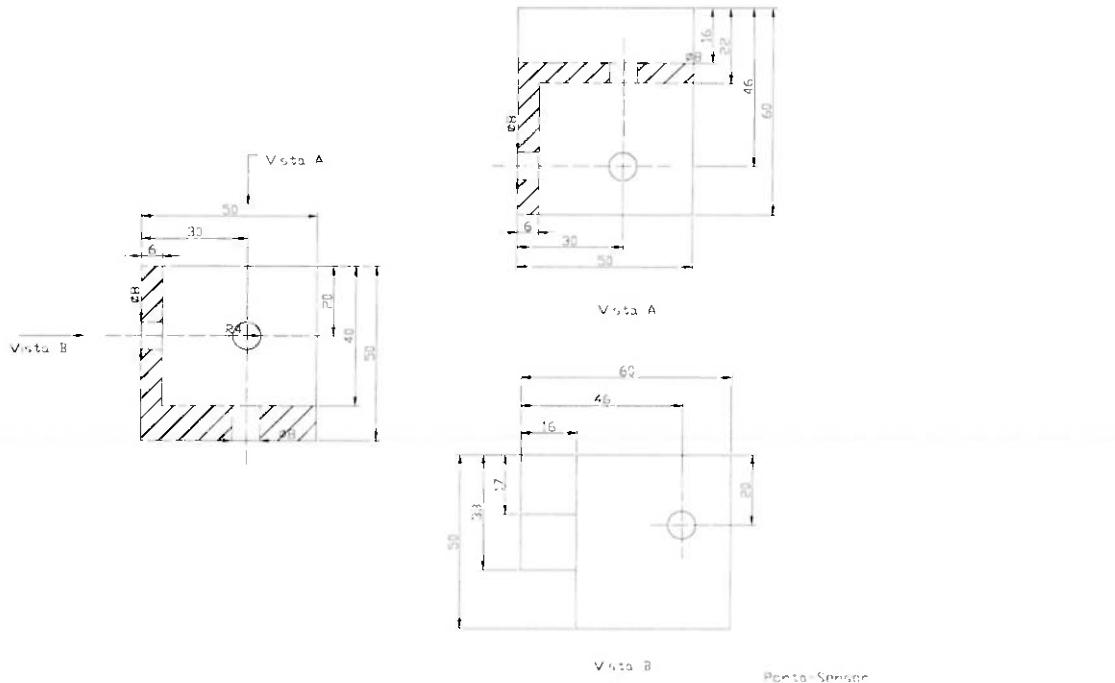


Figura 20 – Desenho do Porta-Sensor

4.1.2. Porta-ferramenta

É a peça mais simples do conjunto, constituindo-se de um pequeno paralelepípedo com um rasgo passante para a acomodação da ferramenta, de três furos passantes rosqueados, acima do rasgo, para os parafusos de fixação da ferramenta e de três furos rosqueados para a fixação ao porta-sensor.

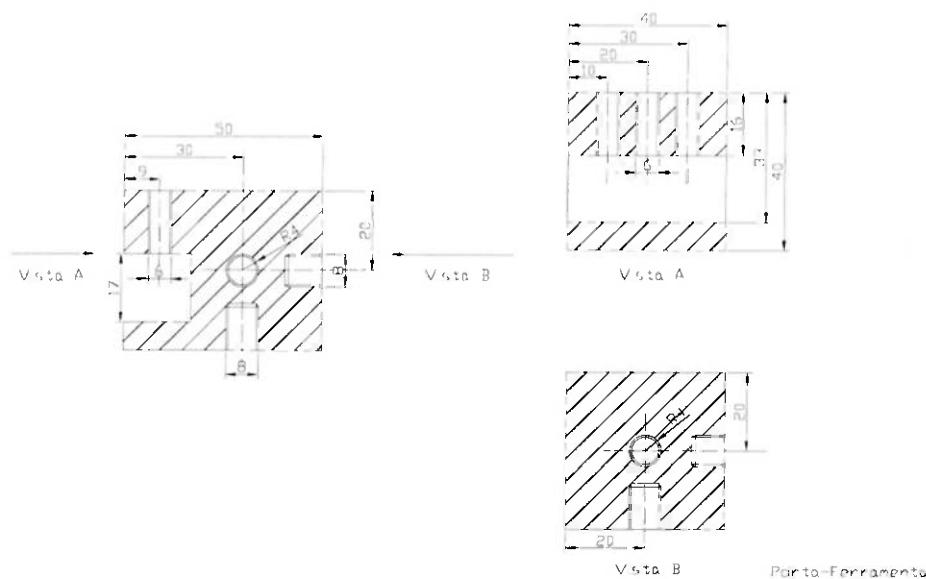


Figura 21 – Desenho do Porta-Ferramenta

4.2. Construção

O porta-sensor foi obtido de um bloco de alumínio de dimensões (aproximadas) de 750x690x710 (em mm). Apesar de exigir uma superfície interna com ângulo de 90°, tal não foi possível de usinar, visto que a máquina de eletroerosão à época não estava disponível/operacional. Assim, optou-se por fabricar a peça inteiramente por fresamento, exigindo um afinamento da superfície de encontro das paredes onde os sensores seriam acomodados.

O porta-ferramenta foi obtido de um bloco de alumínio de dimensões (aproximadas) de 720x590x550 (em mm), sendo fabricado exclusivamente por processo de fresamento.

4.3. Montagem

4.3.1. Montagem dos sensores

Há três sensores piezelétricos no dinamômetro para a medida independente das três componentes da força de usinagem.

Como sensores piezelétricos emitem sinais elétricos quando submetidos a carga, na montagem dos sensores no dinamômetro (corpo condutor) foi necessário o seu isolamento com a utilização de folhas de plástico. A fixação dessas folhas foi efetuado por meio de fitas adesivas após procedimento de limpeza das superfícies (lixo+álcool isopropílico).

Para a captura dos sinais elétricos foram colocadas folhas de cobre coladas (fita adesiva) sobre as folhas de isolamento e em contato com os sensores.

Para a transmissão dos sinais gerados pelos sensores, optou-se pela utilização de cabos coaxiais soldados às folhas de cobre e com conectores BNC.

O posicionamento dos sensores foi feito pelos parafusos de fixação do porta-sensor ao porta-ferramenta, que foram isolados com fita de PVC.

4.3.2. Montagem do dinamômetro

Uma vez montados os sensores, a montagem do dinamômetro consiste apenas na união do porta-sensor ao porta-ferramenta.

A união é feita por meio de três parafusos “allen” M8. É importante observar que os furos passantes de fixação do porta-sensor ao porta-ferramenta não possuem rosca, enquanto que os furos de fixação do porta-ferramenta possuem. Isso é uma medida de segurança contra possíveis erros de centragem entre os furos de fixação das duas peças, que, na fase final de montagem, se mostrou extremamente útil.

Os sensores são fixados por meio da pressão fornecida pela cabeça do parafuso sobre as paredes do porta-sensor resultante da rosca dos furos de fixação do porta-ferramenta (os furos de fixação do porta-sensor não possuem rosca).

A ferramenta é fixada ao porta-ferramenta por meio de parafusos “allen” M6.

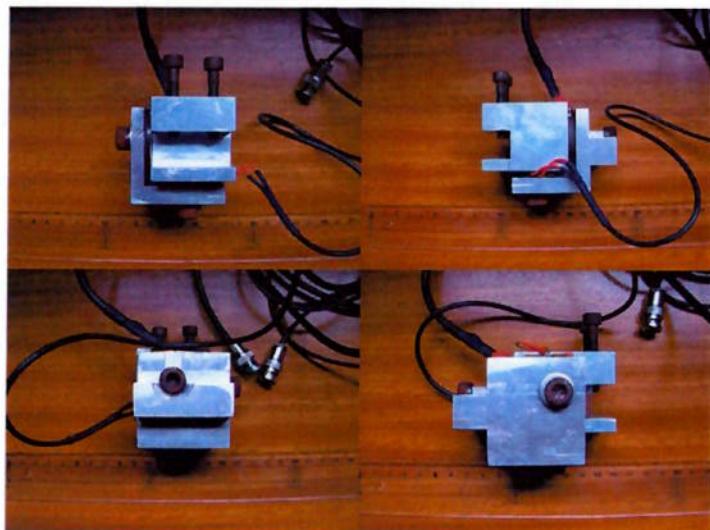


Figura 22 – Fotos de protótipo concluído

5. Testes e análises

O dinamômetro foi ensaiado em uma operação de torneamento real. O material usinado foi PVC, sendo o sinal adquirido por um osciloscópio, que forneceu os sinais para análise.

5.1. Freqüência natural

A determinação da freqüência natural do protótipo foi realizada por meio de curvas de amortecimento, obtidos por ensaios de vibração impostos ao sistema por uma pequena massa, sendo os sinais capturados por um osciloscópio.

As amplitudes médias dos dois primeiros picos da curva de amortecimento apresentaram valores de 117mV e 63,3mV (decremento logarítmico calculado: “d = 0,6143”) e um período (pseudoperíodo/ período da oscilação amortecida: “T”) de 496 μ s (freqüência natural amortecida calculada: “f = 2,016. 10^3 Hz”), permitindo, assim, o cálculo da freqüência natural do sistema:

$$f_n = \frac{(4\pi^2 + d^2)^{\frac{1}{2}}}{2\pi T} = 2,025 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

Observa-se um valor bastante baixo para a freqüência natural do protótipo, o que já era esperado devido à inherente baixa rigidez do alumínio, além de aspectos construtivos que impossibilitaram a execução de maior pressão para a união do conjunto do dinamômetro sob pena de esmagamento das pastilhas piezelétricas.

5.2. Amortecimento

Com os resultados obtidos a partir da curva de amortecimento, também foi possível se determinar o amortecimento do sistema:

$$\beta^2 = \frac{d^2}{4\pi^2 + d^2} \Rightarrow \beta = 9,469 \cdot 10^{-3}$$

5.3. Linearidade

Durante a operação de torneamento, foram realizadas medições para verificar a linearidade do sensor, para a força de corte, sob diferentes condições. Os resultados estão listados abaixo (figura 23):

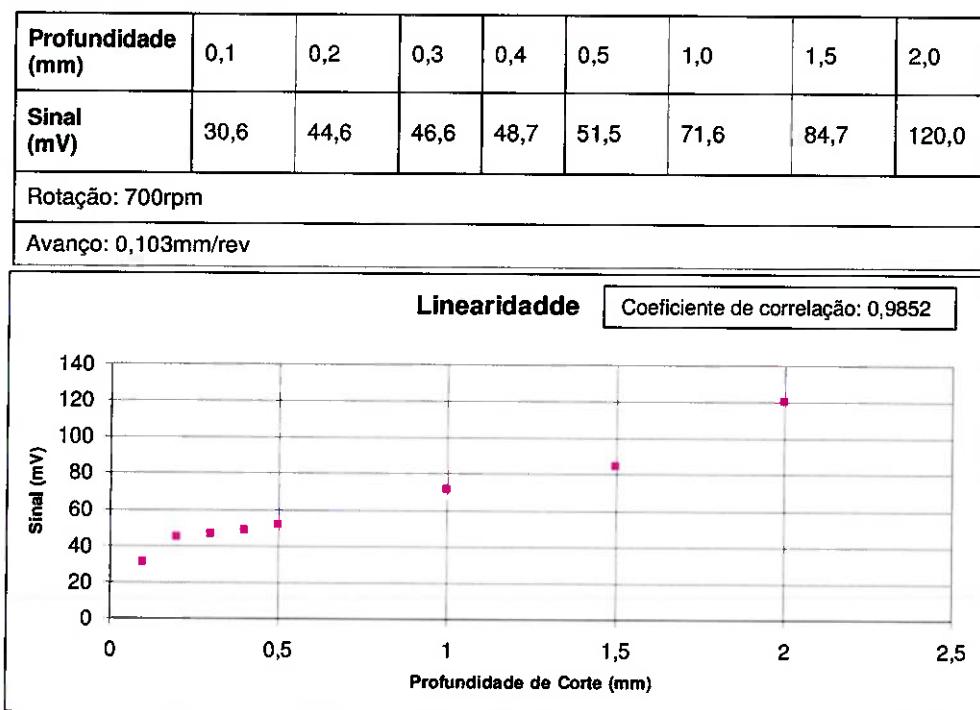


Figura 23 – Resultados do ensaio de linearidade

Conforme pode ser visto pelo coeficiente de correlação, a linearidade do protótipo nesta operação de torneamento foi bastante satisfatória. Entretanto, vale reforçar que o sistema foi concebido para operar sob baixas solicitações. Caso contrário, não se poderá constatar linearidade, bem como se verificará imprecisões de leitura devido à deformação do corpo do protótipo ou até mesmo o rompimento em casos mais extremos.

5.4. Sensibilidade

A determinação da sensibilidade foi obtida experimentalmente, fixando-se ao dinamômetro um motor elétrico (12V, 3A, 5000rpm) acoplado a um rotor ($\phi = 8'' = 203,2mm$) desbalanceado por uma massa ($m = 5g$). Determinado o valor da força centrípeta atuante sobre o sistema ($F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r$), coletaram-se os sinais fornecidos pelo conjunto com o auxílio de um osciloscópio, determinando-se, assim, a sensibilidade. Logo:

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

$$m = 5 \cdot 10^{-3} kg$$

$$\omega = 5000 rpm = 523,58 rad/s$$

$$r = 9,36 \cdot 10^{-2} m$$

$$\therefore F_c = 128,3 N = 13,08 kgf$$

Sinal fornecido pelo osciloscópio:

Força de corte : 355,4mV

Força de avanço : 341,2mV

Força de penetração : 336,7mV

Sensibilidade:

Força de corte : 27,17mV / kgf

Força de avanço : 26,09mV / kgf

Força de penetração : 25,74mV / kgf

Aplicando estes valores de sensibilidade ao valor de saída de 51,5mV obtido para a força de corte, com profundidade de 0,5mm, no ensaio de linearidade, resulta em uma força de corte aplicada de 1,89kgf.

Como comparativo, pode-se aplicar a estimativa da força de corte pelo critério AWF para "bakelite", material bastante semelhante ao PVC ensaiado (nas tabelas pesquisadas não foi possível encontrar parâmetros para PVC para os critérios ASME, AWF, Kienzle e Kronenberg, sendo o "bakelite" da AWF o mais próximo). Assim:

$$K_s = \frac{C_w}{a^{0,477}}$$

$$C_w = 16,2 \text{ ("bakelite")}$$

$$a = 0,103\text{mm/rev}$$

$$\therefore K_s = 47,91\text{kgf / mm}^2$$

$$F_c = K_s \cdot a \cdot p$$

$$K_s = 47,91\text{kgf / mm}^2$$

$$a = 0,103\text{mm/rev}$$

$$p = 0,5\text{mm}$$

$$\therefore F_c = 2,47\text{kgf}$$

Conforme pode ser verificado há uma discrepância entre os dois valores obtidos. Isto se deve ao fato de, além do material utilizado para cálculo não ser o mesmo, o critério AWF ser apenas uma estimativa, apresentando inúmeras simplificações para a obtenção deste valor. Na verdade, todos os critérios são simplificações em diferentes graus, sendo, por isso, chamados de estimativas da força de corte. O valor destes critérios reside no fato de nos oferecerem uma idéia de grandeza dos esforços aplicados durante a operação de torneamento (estabelecendo limites superiores), sendo inherentemente imprecisos (daí a importância de medições com dinamômetros). Portanto, o valor encontrado pela sensibilidade para a força de corte é bastante razoável.

6. Conclusões

Como dito anteriormente, o protótipo foi construído em alumínio devido à sua disponibilidade na oficina, bem como à sua facilidade de usinagem. Assim, desde o início, sabia-se que ele não poderia ser submetido a solicitações muito elevadas tanto devido à baixa rigidez/resistência do alumínio como à sua consequente reduzida freqüência natural.

Contudo, para a faixa de operação para que ele foi projetado (baixas solicitações), o protótipo obteve desempenho satisfatório, apresentando boa linearidade e sensibilidade condizente com a realidade.

7. Bibliografia

- [1]. "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Ferraresi, D., 1970, Editora Edgard Blücher.
- [2]. "Tecnologia Mecânica", Chiaverini, V., 1986, Editora McGraw-Hill.
- [3]. "The selection of sensors", Shieh, J., Huber, J.E., Fleck, N.A., Ashby, M.F., Progress in Material Science 46 (2001) 461-504.
- [4]. "Integrated Force Measurement for On-line Cutting Geometry Inspection", Rao, B.C., Gao, R.X., Friedrich, C.R., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.44. n°5, October 2005.
- [5]. "Micromachined Piezoelectric Force Sensors Base don PZT Thin Films", Lee, C., Itoh, T., Suga, T., IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol.43. n°4, July 1996.
- [6]. "A Piezoelectric Force/Force Device Sensor for Robotic Applications", Pandian, S.R., Okuda, T., Mitani, Y., Kurahashi, K., Kawamura, S., SICE July 95.
- [7]. "Usinagem dos Metais", Machado, A.S., Apostila, DEEME – UFU.

Apêndice

Características prováveis da pastilha piezelétrica utilizada (as características reais não são fornecidas pelo fabricante):

PZT						
P (g/cm³)	T_c (°C)	E	K_p	d₃₃ (μC/N)	P_r (μC/cm²)	E_c (KV/cm)
7,5	360	10000	0,44	285	12,8	26,0