

621.9
S163r
TES/mem

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

**RELAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE O RAIOS DE CURVATURA NATURAL
DO CAVACO E OS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE USINAGEM.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

WISLEY FALCO SALES

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

Orientador : Prof. Álisson Rocha Machado, PhD.

Banca Examinadora:

Prof. Álisson Rocha Machado, PhD (UFU)

Prof. Alexandre Mendes Abrão, PhD (UFU)

Prof. João Fernando Gomes de Oliveira, Dr. (EESC - USP-São Carlos)

Prof. Marcus A. V. Duarte, Dr. (UFU)

Gabriel José dos Santos (Fiat Automóveis S.A.)

DIRBI/UFU

621.9 S163r /TES/FU
08343/95



1000022716

RESUMO

Neste trabalho determinou-se experimentalmente a relação entre o raio de curvatura natural do cavaco e os principais parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, ângulo de saída da ferramenta e profundidade de corte), no corte ortogonal, dos aços ABNT 1020 e ABNT 5140. Os raios de curvatura foram determinados através de um analisador de imagens, após a filmagem e gravação dos testes em vídeo cassete. Ajustou-se uma função polinomial de terceiro grau, para o conjunto de pontos encontrados, e através de um ajuste de sensibilidade, encontrou-se os parâmetros mais influentes na curvatura natural do cavaco. Em ordem decrescente: para o aço ABNT 1020, profundidade de corte, avanço, ângulo de saída e velocidade de corte e para o aço ABNT 5140, profundidade de corte, ângulo de saída, avanço e velocidade de corte respectivamente.

ABSTRACT

A relationship between chip curling and the main cutting parameters was experimentally determined. The parameters considered were cutting speed, feed rate, depth of cut and rake angle. Orthogonal cutting of ABNT 1020 and ABNT 5140 steels was performed and recorded with a VHS camera and the chip curling was determined using an image analyser.

A third degree polynomial function was adjusted for the set of points encountered and the ranking of the influence of the parameters was found by using the Sensibility Adjust Technique. In decreasing order for the ABNT 1020 steel the ranking was: depth of cut, feed rate, rake angle and cutting speed. For the ABNT 5140 steel the ranking was: depth of cut, rake angle, feed rate and cutting speed.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e Orientador Álisson Rocha Machado, pela orientação e pelo incentivo à minha formação acadêmica e pelo suporte técnico fundamental à realização desta dissertação.

A todos os membros da Oficina Mecânica da UFU, pela colaboração na confecção dos corpos de prova e execução dos testes de torneamento.

A todos os membros do Laboratório PROSOLDA/UFU, pelo suporte técnico nas operações de filmagem, durante os testes.

Aos membros do Laboratório de Materiais LEM/UFU, pelo suporte técnico para a medição da curvatura do cavaco, no analisador de imagens.

Aos membros do Laboratório de Pesquisa Usinagem LPU/UFU, em especial ao Técnico Reginaldo.

Às Empresas Fiat Automóveis S.A. e Sandvik do Brasil, pelo fornecimento de materiais e ferramentas respectivamente, para execução dos testes.

A todos os meus colegas do Curso de Mestrado que me ajudaram durante este trabalho.

Ao Professor Marcus Duarte pelo apoio no tratamento estatístico dos resultados.

Ao suporte financeiro da CAPES, através da concessão de bolsa de estudo.

À minha esposa, Sandra

Ao meu filho, Lucas

Aos meus pais, Renato e Elza

Aos meus irmãos, Ronie, Renata e Keila.

ÍNDICE

NOTAÇÕES	v
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - Evolução Histórica no Estudo do Controle do Cavaco	4
2.2 - Mecanismo da Formação do Cavaco	5
2.2.1 - Interface Cavaco-Ferramenta	8
2.2.1.1 - Atrito	10
2.2.2 - Zona de Aderência	13
2.2.3 - Zona de Escorregamento	13
2.2.4 - Aresta Postiça de Corte (APC)	14
2.3 - Classificações dos Cavacos	16
2.3.1 - Estudo das Classes do Cavaco	16
2.3.1.1 - Cavacos Contínuos	16
2.3.1.2 - Cavacos Parcialmente Contínuos	17
2.3.1.3 - Cavacos Descontínuos	18
2.3.1.4 - Cavacos Segmentados	19
2.3.2 - Formas de Cavacos	20
2.4 - Capacidade de Quebrar Cavacos	21

2.4.1 - Material da Peça	22
2.4.2 - Área de Contato Cavaco Ferramenta	22
2.4.3 - Geometria da Ferramenta	22
2.4.4 - Condições de Corte	23
2.4.4.1 - Velocidade de Corte (V_c)	23
2.4.4.2 - Profundidade de Corte (a_p)	24
2.4.4.3 - Avanço (f)	24
2.4.5 - Fluido de Corte	24
2.4.6 - Rigidez da Máquina Operatriz	25
2.5 - Métodos de Controle do Cavaco	25
2.5.1 - Desaceleração Intermitente do Avanço	25
2.5.2 - Método Hidráulico	26
2.5.3 - Método dos Quebra-Cavacos Inseridos na Ferramenta	27
2.5.3.1 - Teoria dos Quebra-Cavacos	27
2.6 - Corte Ortogonal	32
3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
3.1 - Equipamentos	37
3.2 - Materiais	38
3.2.1 - Aço ABNT 5140 (DIN 41Cr4)	38
3.2.2 - Aço ABNT 1020	39
3.3 - Ferramentas Utilizadas para Determinação do Raio de Curvatura Natural do Cavaco, r_c , no Corte Ortogonal	41

3.4 - Determinação do Raio de Curvatura Natural do Cavaco	41
3.5 - Condições de Corte Utilizadas	42
3.5.1 - Aço ABNT 1020	42
3.5.2 - Aço ABNT 5140	42
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 - Aço ABNT 1020	43
4.2 - Aço ABNT 5140 (DIN41Cr4)	49
5 - CONCLUSÕES	57
6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	59
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO 1 - CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADAS E VALORES MEDIDOS DE r_c PARA O AÇO ABNT 1020	68
ANEXO 2 - CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADAS E VALORES MEDIDOS DE r_c PARA O AÇO ABNT 5140	76
ANEXO 3 - SISTEMA DE ANÁLISE DE IMAGENS	81

ANEXO 4 - POLINÔMIO AJUSTADO PARA O AÇO ABNT 1020	84
ANEXO 5 - POLINÔMIO AJUSTADO PARA O AÇO ABNT 5140	85
ANEXO 6 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO TOTAL PARA O AÇO ABNT 5140	86
ANEXO 7 - PROGRAMA FEITO PARA TRAÇAR O GRÁFICO, PARA O AÇO ABNT 1020, DE r_c , MANTENDO-SE OS DEMAIS PARÂMETROS CONSTANTES	87
ANEXO 8 - PROGRAMA FEITO PARA TRAÇAR O GRÁFICO, ATRAVÉS DE INTERPOLAÇÃO LINEAR, PARA O AÇO ABNT 5140, DE r_c X γ , MANTENDO-SE OS DEMAIS PARÂMETROS CONSTANTES	89
ANEXO 9 - PROGRAMA FEITO PARA TRAÇAR O GRÁFICO, ATRAVÉS DE INTERPOLAÇÃO DE SEGUNDO GRAU, PARA O AÇO ABNT 5140, DE r_c X γ , MANTENDO-SE OS DEMAIS PARÂMETROS CONSTANTES	90

NOTAÇÕES

a_p	-	Profundidade de Corte;
f	-	Avanço;
γ , Gama, g	-	Ângulo de saída da ferramenta;
V_c	-	Velocidade de Corte;
r_c	-	Raio de Curvatura Natural do Cavaco;
ϕ	-	Ângulo de Cisalhamento do Plano Primário pelo formado entre o plano de cisalhamento primário e o plano de corte principal);
h	-	Espessura de Corte;
h'	-	Espessura do Cavaco;
V_{cav}	-	Velocidade de Saída do Cavaco;
R_c	-	Grau de Recalque;
μ	-	Coefficiente de Atrito;
A	-	Área de Contato Aparente;
A_r	-	Área Real de Contato;
β	-	Coefficiente de Atrito (aplicado à usinagem);
σ_{fav}	-	Tensão Normal Média;
λ_B	-	Ângulo de Saída da Ferramenta;
χ_r	-	Ângulo de Posição da Ferramenta;
ϵ_f	-	Deformação Crítica na Fratura;
l_n	-	Distância do Quebra-Cavaco da Aresta de Corte;

lf	-	Comprimento de Contato Cavaco-Ferramenta;
t	-	Altura do Quebra-Cavaco;
σ	-	Ângulo da Cunha do Quebra-Cavaco;
q_n	-	Raio da Cratera do Quebra-Cavaco;
QF, QM, QR, MF	-	Geometrias Diferenciadas de Quebra-Cavacos;
APC	-	Aresta Postiça de Corte;
b	-	Largura de Corte;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
2.1 - Diagrama Esquemático da Cunha de Corte	6
2.2 - Esquema Mostrando as Zonas de Cisalhamento Primária e Secundária	7
2.3 - Regiões de Aderência e de Escorregamento	9
2.4 - Área Real de Contato numa Superfície Submetida a Carga	10
2.5 - Os três Regimes de Atrito Sólido	11
2.6 - Modelo de Distribuição de Tensões proposto por Zorev	12
2.7 - Aresta Postiça de Corte (APC)	15
2.8 - Cavacos Contínuos	17
2.9 - Cavacos Descontínuos	18
2.10 - Cavacos Segmentados	20
2.11 - Discriminação da Forma do Cavaco Segundo ISO 3685	21
2.12 - Método da Desaceleração Intermitente do Avanço	26
2.13 - Método Hidráulico para quebra do Cavaco	27
2.14 - Quebra-Cavaco Postiço	28
2.15 - Forma Especial na Superfície de saída, tipo Anteparo	29
2.16 - Forma Especial sa Superfície de Saída da Ferramenta, tipo Cratera	29

2.17 - Diversas Geometrias de Ferramentas	31
2.18 - Exemplos de Corte Ortogonal	33
3.1 - Diagrama Esquemático dos Equipamentos Utilizados na Filmagem do Corte Ortogonal	35
3.2 - Diagrama Esquemático dos Equipamentos Utilizados na medição de r_c	36
3.3 - Micrografia do Aço AISI 5140	38
3.4 - Seção Transversal da Barra Ilustrando os Pontos Onde se Mediu Dureza	39
3.5 - Vista Esquemática do Corpo de Prova para os Testes	40
4.1 - Variação de r_c X ap	45
4.2 - Variação de r_c X f	46
4.3 - Variação de r_c X γ	46
4.4 - Variação de r_c X Vc	47
4.5 - Variação de r_c X ap	51
4.6 - Variação de r_c X f	51
4.7 - Variação de r_c X γ	52
4.8 - Variação de r_c X Vc	52
4.9 - Variação de r_c X γ , ajuste com polinômio de primeiro grau	54
4.10 - Variação de r_c X γ , ajuste com polinômio de segundo grau	54

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o aperfeiçoamento das máquinas operatrizes e dos materiais das ferramentas de corte, aumentou-se a produtividade dos processos de fabricação por arrancamento de cavaco. Na usinagem de materiais relativamente dúcteis, como os aços, o cavaco, geralmente contínuo e na forma de fita se coloca como um problema de primeira ordem, sendo que o aumento da velocidade de corte agrava ainda mais o problema, (Jawahir e Luttervelt, 1993 e Fang e Jawahir, 1990).

Isto aumentou a preocupação dos engenheiros de produção com o controle do cavaco. Estudos e esforços têm sido cada vez mais concentrados no sentido de se obter uma forma controlada do mesmo, isto é, que não cause ferimentos ao operador, perdas na qualidade superficial da peça, avarias na ferramenta, na peça ou na máquina operatriz, e que não sejam problemáticos para a sua remoção, descarte ou reprocessamento. Tudo isto para não promover custos adicionais e aumento no valor final das peças produzidas. Desde a década de 50, com a exigência imperativa de se controlar mais efetivamente o cavaco, devido ao aumento das condições de corte, impulsionadas pelo avanço tecnológico do conjunto peça/máquina/ferramenta de corte, pesquisadores, (Cook, Jhaveri et

al, 1963 e Jawahir e Lutervelt, 1993) iniciaram estudos analíticos e experimentais sobre os fatores que influenciam na classe/forma e capacidade de quebra do cavaco. Eles chegaram à conclusão de que os principais parâmetros a serem considerados para estudo são os seguintes:

- Máquina operatriz/características operacionais;
- Propriedades do material da peça;
- Geometria da ferramenta;
- Fluido de corte;
- Propriedades do material da ferramenta;
- Condições de corte;
- Projeto dos quebra-cavacos.

Atualmente, no Brasil, não existem trabalhos científicos relacionados ao controle do cavaco. Este trabalho originou de interesses da Fiat Automóveis S.A., que possui problemas na sua linha de produção, com formação de cavacos contínuos, que se enrolam entre a peça e a ferramenta, tornando difíceis de serem retirados, isto é, promovendo um tempo inativo para a sua remoção, e reduzindo a vida da ferramenta, principalmente na usinagem da manga de eixo, de aço ABNT 5140;

Neste trabalho procurou-se relacionar o raio de curvatura natural do cavaco, r_c , com a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e ângulo de saída da ferramenta, com objetivo de verificar como cada parâmetro, individualmente, interfere na curvatura do cavaco, já que quanto menor r_c , maiores

são os níveis de tensões, no material da peça, e mais fácil torna-se a quebra do cavaco, (Shaw 1984).

Este trabalho está subdividido nos seguintes tópicos:

- Neste Capítulo 1 faz-se uma breve discussão da presente pesquisa e o porquê de estar sendo realizada.
- O Capítulo 2 é uma revisão bibliográfica mostrando o que é encontrado na literatura a respeito do assunto em estudo. É mostrado como a interface cavaco-ferramenta e os principais parâmetros de usinagem influenciam no processo de formação do cavaco, e faz-se uma análise individual do efeito de cada parâmetro no processo.
- O Capítulo 3 apresenta o procedimento experimental utilizado, para os dois aços em estudo.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados encontrados e as discussões, para cada aço em estudo.
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões que foram encontradas neste trabalho.
- O Capítulo 6 apresenta sugestões para novos trabalhos.
- O Capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas consultadas.
- O Capítulo 8 apresenta os anexos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- EVOLUÇÃO HISTÓRICA NO ESTUDO DO CONTROLE DO CAVACO:

Segundo Jawahir e Luttervelt (1993) pode-se dividir a evolução histórica dos estudos do controle do cavaco nas seguintes etapas:

ETAPA 1: De 1900-1949: Atenção básica à geometria da ferramenta com objetivo de se reduzir desgastes e forças de usinagem. Nada relativo à saída do cavaco.

ETAPA 2: De 1950-1959: Neste período iniciou-se a preocupação com a saída do cavaco e a sua quebra tornou-se um ponto para estudos. A maneira com que o cavaco se curva e quebra, e como o comprimento de contato cavaco-ferramenta interage com a classe e forma do cavaco tornaram-se pontos a serem investigados.

ETAPA 3: De 1960-1969: Aumentou o interesse em pesquisas básicas sobre a formação do cavaco em todo o mundo com muitos trabalhos sendo publicados. Novos conhecimentos nos mecanismos de sua formação foram adquiridos, com utilização de novas técnicas incluindo o emprego de ferramentas de contato restrito.

ETAPA 4: De 1970-1979: Este foi o período em que mais se estudou a formação do cavaco. Houve grande aumento nas velocidades de corte e, conseqüentemente, o cavaco tornava-se mais problemático. Os

mecanismos básicos como o fluxo de saída, curvatura e quebra do cavaco foram extensivamente estudados através de trabalhos analíticos e experimentais.

ETAPA 5: De 1980-1989: Pesquisas sobre os mecanismos básicos relativos à formação do cavaco tornam-se relevantes. Surgiram novas teorias para dimensionamento do "design" de ferramentas de metal duro e teorias com objetivo de se predizer a classe e a forma do cavaco em diferentes operações, materiais da peça, geometria da ferramenta, etc..

ETAPA 6: De 1990 - até o presente: Neste período têm-se a necessidade de continuar estudos para que se chegue ao "controle total do cavaco". Para tal, os passos seguintes são importantes: reconhecimento das formas básicas do cavaco (fluxo lateral, fluxo para trás, curvatura ascendente e curvatura lateral); determinação dos fatores que influenciam estas formas; modelamento dos processos de quebra para as classes e formas desejáveis. Técnicas experimentais, análises, modelos matemáticos e conhecimentos de engenharia são ferramentas disponíveis para que se tenha "controle total do cavaco". Técnicas computadorizadas como o CAD e o CAM são potentes armas para dimensionamento de novos "designs" de ferramentas com quebra cavacos.

ferramenta.

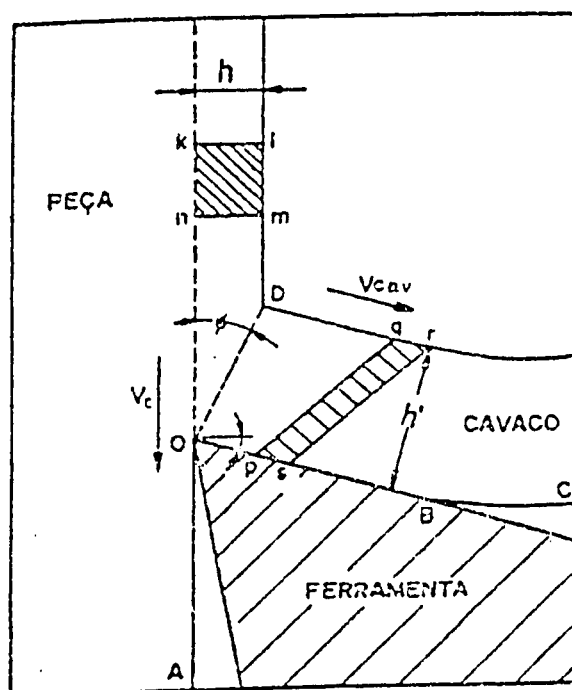


Figura 2.1 - Diagrama esquemático da Cunha de Corte (Trent 1984).

A ação da ferramenta recalca o volume "klmn" e o metal começa a sofrer deformações elásticas. Prosseguindo, o material da peça atinge o limite de escoamento e deforma-se plasticamente. As deformações plásticas prosseguem e as tensões se elevam e ultrapassam o limite de resistência do material, promovendo a sua ruptura, que se inicia com uma trinca no ponto "O" que pode prosseguir até o ponto "D". A região destes campos de tensões e deformações plásticas, chamada de "zona de cisalhamento primária" é simplificada e representada na Figura 2.1 por um plano definido pela linha "OD". A extensão da trinca iniciada no ponto "O" é que

vai determinar a classe do cavaco. Se ela se aflorar a superfície superior do cavaco, haverá a separação de lamelas e o cavaco será descontínuo.

Após o volume "klmn" passar pela zona de cisalhamento primária, já deformado plasticamente, passa-se para um novo formato "pqrs", e se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta, definindo-se uma nova região, como "zona de cisalhamento secundária", representada na Figura 2.1 pelo plano "OB", (Trent 1984). A Figura 2.2, mostra, esquematicamente as duas zonas.

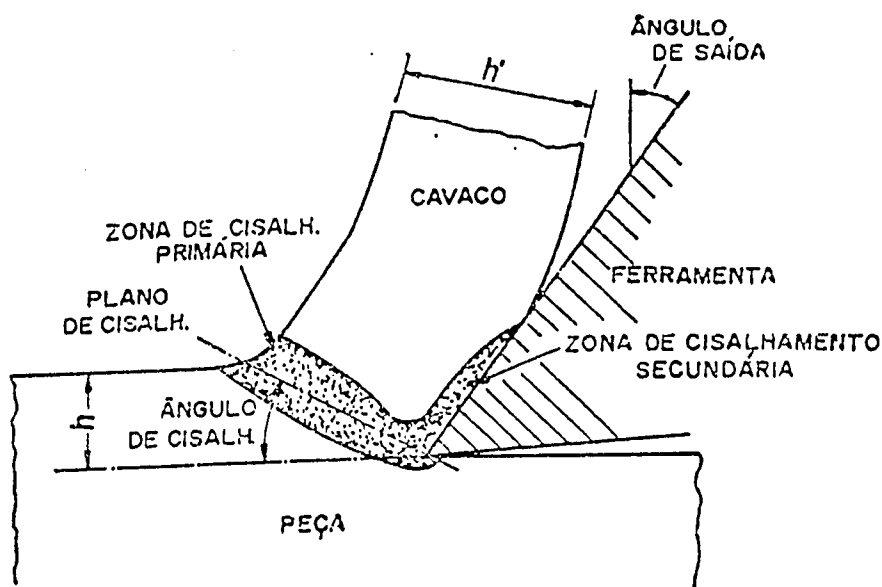


Figura 2.2 - Esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária (Trent 1984).

Das Figuras 2.1 e 2.2, tem-se:

ϕ - o ângulo de cisalhamento do plano primário (ϕ , ângulo formado entre o plano de cisalhamento primário e o plano de corte principal),

h- a espessura de corte,

h' - a espessura do cavaco,

V_c - a velocidade de corte,

V_{cav} - a velocidade de saída do cavaco,

O Grau de Recalque (R_c), que pode representar o percentual de deformação sofrido pelo cavaco no plano de cisalhamento primário, é definido como:

$$R_c = h'/h = V_c/V_{cav} \quad (2.1)$$

O ângulo de cisalhamento, Φ , pode ser determinado pela expressão, (Ferraresi 1977) :

$$\text{tg}\Phi = \cos\gamma_n / (R_c - \text{sen}\gamma_n) \quad (2.2)$$

onde γ_n é o ângulo de saída da ferramenta, medido no plano normal, (NORMA ABNT NBR 6163/80).

2.2.1- INTERFACE CAVACO-FERRAMENTA:

As condições da interface cavaco-ferramenta são fundamentais para se entender o processo de corte, já que interferem diretamente no raio de curvatura natural do cavaco, r_c , e como consequência, na sua quebra. Por isto torna-se de grande importância o seu entendimento.

O processo de formação do cavaco é cíclico, como mencionado, dividido em 04 etapas. A última etapa é o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. Apesar da importância desta

região; já que possui grande influência no mecanismo de formação do cavaco, nas forças de usinagem, nas temperaturas da interface e nas vidas das ferramentas; a sua pequena geometria e as altas velocidades presentes dificultam investigações e portanto as teorias disponíveis sofrem ainda restrições.

Uma das teorias mais aceitas, atualmente, é defendida por Trent (1963), que assume a existência de uma "ZONA DE ADERÊNCIA" entre o cavaco e a ferramenta, e na sua periferia existe uma "ZONA DE ESCORREGAMENTO". A Figura 2.3 identifica estas duas zonas. Linha BC - aderência, CD - escorregamento.

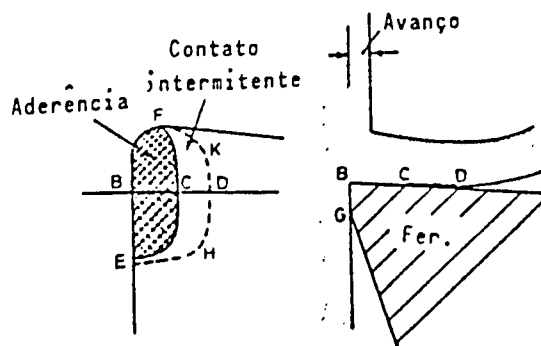


Figura 2.3 - Regiões de Aderência e de Escorregamento, (Trent, 1984).

Análises metalográficas da raiz do cavaco realizadas por Trent (1984), após o corte ter sido interrompido bruscamente, utilizando-se do dispositivo "quick-stop", evidenciam estas regiões. Há a possibilidade de uma zona prevalecer em relação à outra, portanto é necessário um estudo mais detalhado para cada uma das possíveis condições.

Além dessas condições, pode aparecer ainda a aresta postíça de corte, APC, que é um fenômeno que ocorre na usinagem de materiais que contenham 2ª. fase sob baixas condições de corte e avanço, Trent (1963).

2.2.1.1- ATRITO:

Em atrito sólido as superfícies por mais regulares que sejam, ainda apresentam picos e vales, e o contato é feito apenas nos picos das irregularidades das duas superfícies, e a área de contato real (A_r) é menor que a aparente (A). A Figura 2.4 ilustra esta situação.

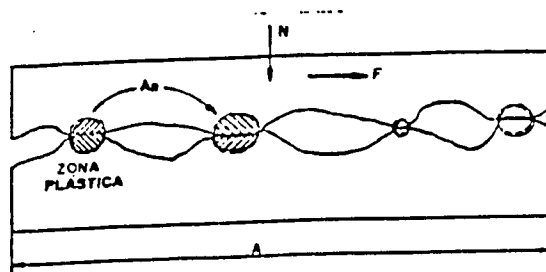


Fig. 2.4 - Área real de contato numa superfície submetida a carga, (Shaw, Ber et al, 1960).

Aumentando-se a carga normal, N , entre as superfícies, os pontos em contato se deformarão plasticamente, aumentando a área de contato real.

Shaw, Ber et al (1960), identificaram três diferentes regimes de atrito sólido, mostrados na Figura 2.5.

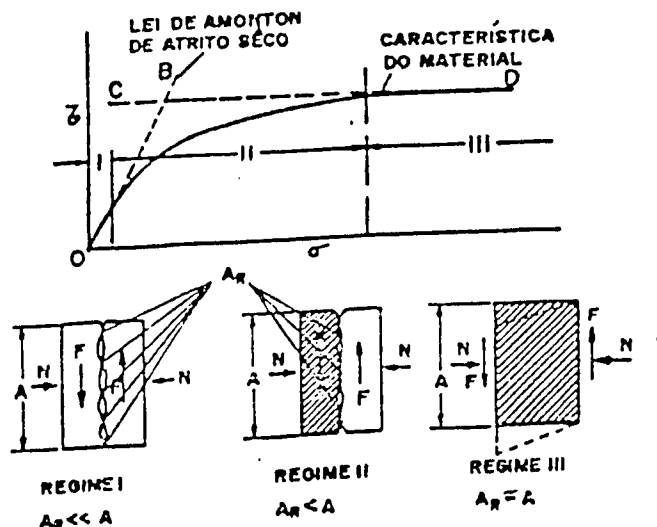


Fig. 2.5 - Os três regimes de atrito sólido, (Shaw, Ber et al, 1960).

- Regime I - É aquele onde vale a lei de Amonton ($\mu = \tau / \sigma$ e $A_r < A$, $\mu = \text{cte.}$). O contato se dá apenas nas irregularidades das superfícies, onde " μ " é o coeficiente de atrito, " τ " é a tensão cisalhante, " σ " é a tensão normal, " A_r " é a área de contato real e " A " é a área de contato aparente.

- Regime III - τ é independente de σ e as duas superfícies estão completamente unidas, ou seja $A_r = A$.

- Regime II - É uma situação de transição entre os regimes I e III.

Na região de aderência, $A_r = A$ e vale o regime III. Na região de escorregamento $A_r \ll A$ prevalecendo o regime I.

Assim o coeficiente de atrito, aplicado à usinagem, pode ser considerado, em termos do ângulo de atrito médio definido por Boothroyd (1981), como:

$$\beta = \arctg(k/\sigma_{fav}) \quad (2.3)$$

onde k é uma constante e σ_{fav} é a tensão normal média que atua na superfície de saída da ferramenta.

Durante a usinagem dos metais, os regimes I e III ocorrem simultâneamente sobre a superfície de saída da ferramenta, ao longo do comprimento de contato cavaco-ferramenta. Zorev (1963), apresentou um modelo de distribuição de tensão sobre a superfície de saída da ferramenta, mostrado na Figura 2.6.

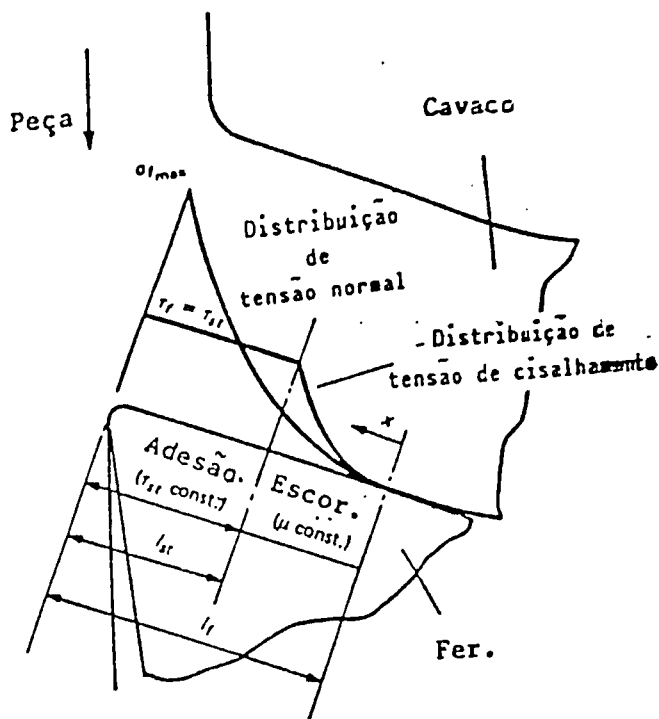


Figura 2.6 - Modelo de distribuição de tensões proposto por Zorev (1963).

Neste modelo o comprimento de contato cavaco-ferramenta é dividido em duas regiões: aderência e escorregamento. Assume-se que

a tensão normal é máxima na ponta da ferramenta e decresce exponencialmente até o final da região de escorregamento e que a tensão de cisalhamento é constante durante a região de aderência e decresce exponencialmente durante a região de escorregamento.

2.2.2- ZONA DE ADERÊNCIA:

Como mencionado anteriormente, através de micrografias da raiz do cavaco, obtidas por interrupções bruscas no corte, Trent (1963), obteve evidências do contato íntimo ao longo de um grande comprimento da interface cavaco-ferramenta. Esta região foi denominada de zona de aderência, que corresponde ao regime III do atrito sólido. Ainda através destas micrografias percebe-se que o fluxo de material não ocorre na interface e sim por uma zona de cisalhamento intenso dentro do material do cavaco, que foi denominada de "zona de fluxo", Trent (1963). A aderência também pode ocorrer na superfície de folga da ferramenta, desde que o desgaste de flanco elimine o ângulo efetivo de folga. As ligações atômicas na interface, que causam a aderência, são devidas às altas tensões de compressão, grandes quantidades e altas taxas de deformações e afinidade química entre os materiais da peça e da ferramenta, Trent (1963).

Trent (1988a, 1988b, 1988c), em suas publicações afirma que as condições de aderência devem se assumidas como inevitáveis.

2.2.3- ZONA DE ESCORREGAMENTO:

A zona de escorregamento é observada na periferia da zona de

aderência, Trent (1988a). Nesta região a área real é muito menor que a área aparente, que corresponde ao regime I de atrito sólido. A zona de fluxo desaparece já que as ligações são mais fracas que as internas da peça e da ferramenta. Segundo Wright (1981), as condições de escorregamento ou aderência dependem de:

- Afinidade química entre os materiais da ferramenta e da peça;
- Condições atmosféricas;
- Tempo de usinagem;
- Velocidade de corte.

2.2.4 - ARESTA POSTIÇA DE CORTE (APC):

A aresta postiça de corte é um fenômeno que ocorre durante a usinagem, à relativas baixas velocidades de corte, formado por uma porção de material encruado que se posiciona entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco em formação.

Durante o corte, sob altas tensões cisalhantes os metais sofrem um fenômeno de "endurecimento", conhecido por encruamento. Sobre a superfície de saída da ferramenta é formada uma camada de material arrancado da peça, com dimensões micrométricas, intimamente aderida. Trent (1988b), afirma que esta primeira camada de material que se une à ferramenta, através de ligações atômicas, é encruado, aumentando assim, o seu limite de escoamento, e as tensões de cisalhamento são insuficientes para quebrar estas ligações. As deformações continuam, então nas camadas adjacentes, mais afastadas da interface, até que elas também sejam encruadas. Pela repetição deste processo, uma sucessão de camadas formam a APC. O seu tamanho não cresce indefinidamente. Quando se atinge um

valor no qual a tensão de cisalhamento é suficiente para mudar a zona de cisalhamento primária, que até então estava acima da APC, para dentro do corpo desta, parte de sua estrutura é cisalhada e arrastada entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta.

Milovik e Wallbank (1983), analisando a microestrutura da aresta postiça de corte, utilizando microscopia eletrônica e ótica, encontraram várias microtrincas na zona de cisalhamento ao redor da APC, entre os pontos A e B da Figura 2.7. Foi verificado que estas microtrincas eram responsáveis pela abertura das trincas nos pontos A e B, e eram geradas pela presença da 2ª. fase no material que, durante o cisalhamento, se deforma diferentemente da matriz, criando um estado triaxial de tensão que promove o aparecimento das microtrincas. Isto explica a necessidade de 2ª. fase no material para se formar a APC, como observaram Williams e Rollanson (1970).

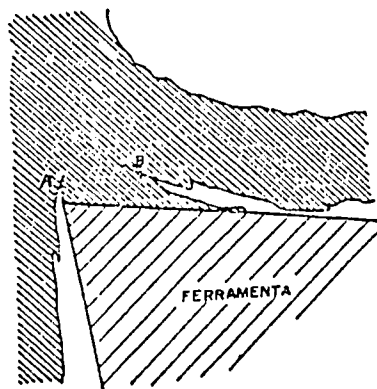


Figura 2.7 - Aresta Postiça de Corte - APC, (Trent 1963).

2.3 - CLASSIFICAÇÕES DOS CAVACOS:

Os cavacos são classificados quanto a classe e forma. Quanto à classe podem ser contínuos, parcialmente contínuos, descontínuos ou segmentados. Alguns autores, como Ferraresi (1977), assumem os parcialmente contínuos e os segmentados como uma única classe, denominada cavaco de cisalhamento. Outros, como Jawahir e Luttervelt (1993), fazem a classificação como contínuo, segmentado (que aglutina segmentado com parcialmente contínuo) e descontínuo.

Quanto à forma, a NORMA ISO 3685 (1977), faz uma classificação que será detalhada posteriormente.

2.3.1- ESTUDO DAS CLASSES DO CAVACO:

2.3.1.1- CAVACOS CONTÍNUOS:

O metal cisalha, mantendo uma continuidade no cavaco, de forma homogênea e usualmente mostrando um regime de deformação plástica pseudo-estacionária, dentro da zona de cisalhamento primária. Estes cavacos são comuns em materiais dúcteis, como aços baixa liga, alumínio e cobre.

Cook et al (1954) explicaram a sua formação como segue: é estabelecido um campo de tensões de tração, na ponta da ferramenta produzindo deformações plásticas até a ruptura, separando o material. Imediatamente após, existe um campo de tensão de compressão, suprimindo a propagação da trinca. Estes campos de tensões normais, são influenciados pelo ângulo de cisalhamento, ϕ , e pelas condições da interface cavaco-ferramenta. Fatores que influenciam estas tensões podem alterar a classe do cavaco, mesmo para materiais dúcteis, como ângulo de saída, γ_0 , velocidade de

corde, V_c , avanço, f , profundidade de corte, a_p , fluido de corte, adição de elementos de livre corte (Pb, Te, Se, S em conjunto com Mn) e rigidez da máquina ferramenta. Estes fatores serão analisados em itens subsequentes. A Figura 2.8 mostra um esquema característica desta classe.

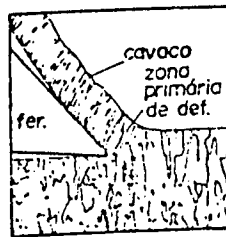


Figura 2.8 - Cavacos contínuos (Boothoyd 1981).

2.3.1.2- CAVACOS PARCIALMENTE CONTÍNUOS:

É uma classe intermediária entre os cavacos contínuos e os descontínuos. Cook et al (1954) explicaram esta classe de duas maneiras:

- a) a energia elástica acumulada na ponta da ferramenta pode não ser suficiente para continuar a propagação da trinca;
- b) a presença de grande campo de compressão no plano primário, pouco além da ponta da ferramenta, pode suprimir a propagação da trinca.

2.3.1.3- CAVACOS DESCONTÍNUOS:

Esta classe é comum quando usinando materiais frágeis e heterogêneos, com pouca capacidade de deformação e pouca resistência a campos de tensões de tração. As condições de corte (V_c , f , ap) e geometria da ferramenta podem promover estes cavacos em materiais semi-dúteis. Neste caso, há propagação da trinca por todo o plano de cisalhamento primário, separando o cavaco em pequenos fragmentos. A zona de cisalhamento secundária também influencia o processo. Inicialmente haverá um acúmulo de material na ponta da ferramenta, devido à componente da força tangencial, na superfície de saída, ser menor que a necessária para promover o deslizamento do cavaco. A separação dos fragmentos ocorre devido ao aumento da relação força tangencial/força normal. A Figura 2.9 mostra um esquema característico desta classe.

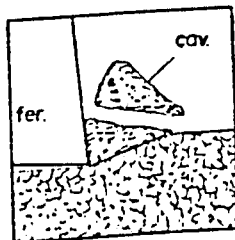


Figura 2.9 - Cavacos descontínuos (Boothroyd 1981).

2.3.1.4- CAVACOS SEGMENTADOS:

Existem vários trabalhos, Komanduri e Brown (1981), Jawahir e Luttervelt (1993), a respeito desta classe.

As características físicas e metalúrgicas do material da peça podem influenciar a formação do cavaco e sua quebra. O fenômeno de formação do cavaco segmentado foi estudado e denominado por Recht (1964), como "cisalhamento termoplástico catastrófico" e por Le Maire (1972), como "cisalhamento adiabático", sendo explicado como segue: durante a deformação há um encruamento em regiões localizadas (em defeitos, contornos de grãos, incrustações,...) aumentando a resistência do material, mas este aumento é excedido pela diminuição da resistência, devido ao aumento localizado da temperatura. Se a taxa de deformação é alta, o processo torna-se adiabático e há um superaquecimento em estreitas áreas promovendo um amolecimento localizado, até que há o cisalhamento instantâneo nesta faixa, promovendo uma rotação neste plano que se afasta da ponta da ferramenta e se movimenta sobre a superfície de saída. Esta rotação prossegue até que o aumento da força devido a esta rotação exceda a força necessária para deformar plasticamente o material mais frio num plano mais favorável. Este processo é cíclico e depende basicamente das seguintes condições: baixa condutividade térmica do material da peça, endurecimento por deformação (encruamento) e sensibilidade na taxa de deformação.

Foi verificado por Recht (1964), que qualquer material pode produzir cavacos segmentados, desde que a velocidade de corte seja suficientemente alta para promover o amolecimento do material de

maneira a superar o encruamento na região de cisalhamento primário.

Komanduri et al (1982) e Komanduri e Schroeder (1986), encontraram para o Inconel 718, acima de 61 [m/min] o cisalhamento adiabático, e para o aço AISI 4340 a velocidade encontrada foi acima de 275 [m/min]. Recht[29] define esta velocidade, acima da qual o fenômeno ocorre, como "velocidade crítica". A Figura 2.10 mostra um esquema característico desta classe.

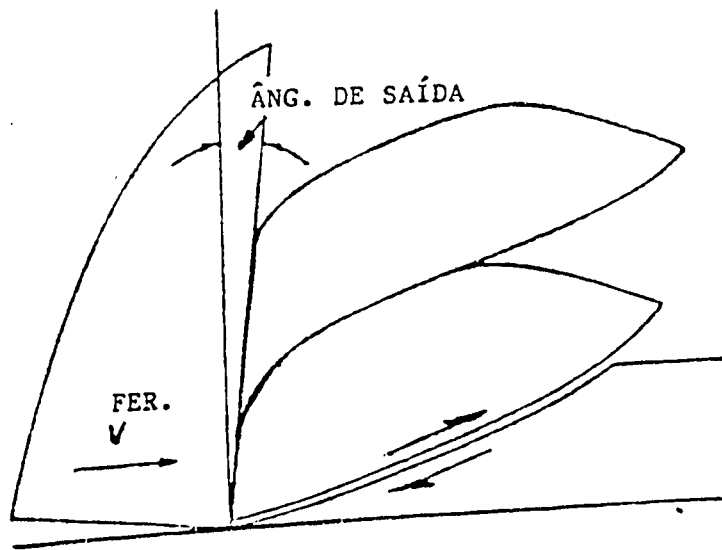


Figura 2.11 - Cavacos segmentados (Komanduri e Turkovich 1981).

2.3.2- FORMAS DE CAVACOS:

A Norma ISO 3685 (1977), faz uma classificação detalhada da forma dos cavacos de acordo com a Figura 2.11.

























1. Cavaco em fita	2. Cavaco tubular	3. Cavaco (scira)	4. Cavaco hel. tipo arruela	5. Cavaco helic. conico	6. Cavaco em arco	7. Cavaco simples	8. Cavaco tipo agulha
							
1.1 Longo	2.1 Longo	3.1 Plano	4.1 Longo	5.1 Longo	6.1 Conect.		
							
1.2 Curto	2.2 Curto	3.2 Conico	4.2 Curto	5.2 Curto	6.2 Salto		
							
1.3 [Caranh]	2.3 [Caranh]		4.3 [Caranh]	5.3 [Caranh]			
							

Figura 2.11 - Discriminação da forma do cavaco segundo ISO 3685 (1977).

A forma do cavaco é dependente, principalmente, do material da peça, da classe, das condições de corte e geometria da ferramenta (γ_0 , quebra cavacos).

2.4- CAPACIDADE DE QUEBRAR CAVACOS:

Os fatores dominantes na classe e forma dos cavacos são, Machado e Silva (1993):

- Material da peça;
- Área de contato cavaco-ferramenta;
- Geometria da ferramenta;
- Condições de corte;
- Fluido de corte;
- Rigidez da máquina operatriz;

Estes fatores serão analisados individualmente:

2.4.1- MATERIAL DA PEÇA:

Este é o parâmetro principal quanto à classe do cavaco produzido. Materiais dúcteis, como metais puros, aços de baixa liga, cobre, e outros, apresentam tendência de produzir cavacos contínuos, geralmente na forma de fita. Materiais frágeis, heterogêneos, como ferro fundido cinzento, produzem cavacos descontínuos, em pedaços ou lascas.

Materiais com baixa condutividade térmica, como titânio e suas ligas, produzem cavacos segmentados. Recht (1964), afirma que esta classe de cavaco pode ocorrer em qualquer material, desde que em velocidades de corte acima da crítica.

A adição de elementos de livre corte (Pb, Te, Se, S juntamente com Mn) também pode alterar a classe do cavaco, (Trent 1984).

2.4.2- ÁREA DE CONTATO CAVACO FERRAMENTA:

A área de contato cavaco ferramenta depende do material da peça, da afinidade química entre os materiais da peça e da ferramenta, das condições de corte, da geometria da ferramenta e do fluido de corte. Pequenas áreas de contato promovem uma maior curvatura do cavaco, tendendo a facilitar a quebra devido aos maiores campos de tensões envolvidos.

2.4.3- GEOMETRIA DA FERRAMENTA:

Os ângulos de saída, inclinação e de posição são os que mais influenciam quanto à classe e forma do cavaco, Ferraresi (1977).

Aumentando-se o ângulo de saída, γ_0 , (+), há a tendência de se promover o cavaco contínuo, enquanto diminuindo-o, há tendência de promover o cavaco descontínuo.

O ângulo de inclinação, λ_s , faz com que o cavaco flua lateralmente, se maior que zero, e ao encontrar um obstáculo (superfície de folga da ferramenta ou porta ferramentas) pode promover a sua quebra. Inclinação menor que zero faz com que o cavaco se volte e choque com o material da peça e pode se quebrar.

O ângulo de posição, χ_r , também influencia na direção de saída do cavaco e com o seu aumento promove um aumento na espessura do cavaco (h'), diminuindo a curvatura do cavaco (r_c), melhorando a quebra. Pode-se configurar a superfície de saída da ferramenta, com o objetivo de se curvar mais o cavaco e promover a sua quebra, que será mostrado posteriormente no tópico "Teoria dos Quebra Cavacos", item 2.5.3.1.

2.4.4- CONDIÇÕES DE CORTE:

2.4.4.1- VELOCIDADE DE CORTE (V_c):

Segundo Fang e Jawahir (1990), quando usinando o aço AISI 1040 com ferramenta TNMG160408ENZ, em $V_c \leq 50$ m/min, a capacidade de quebra dos cavacos é muito boa, para vários "f" e "ap" testados ($0.06 \leq f \leq 0.5$ mm/rot e $0.25 \leq ap \leq 4.0$ mm), devido a existência da APC (Aresta Postiça de Corte). Para $50 \leq V_c \leq 150$ m/min, são verificados os seguintes efeitos: para pequenos "ap", a quebra do cavaco não é boa para todos "f"; para grandes "ap", a capacidade de quebra não é boa somente para pequenos "f". Quando usinando com $V_c \geq 150$ m/min,

2.4.4.2- PROFUNDIDADE DE CORTE(ap):

Segundo Fang e Jawahir (1990) o efeito de "ap" varia com diferentes valores de "f". Testes usando ferramentas com quebra cavacos ENZ, para o aço AISI 1040, em baixos "f" (0.1 mm/rot), a capacidade de quebra diminui com o aumento de "ap", e o oposto ocorre com f (0.3 mm/rot). Segundo estes pesquisadores a razão é que geralmente com o aumento de "ap" a forma do cavaco muda de longo para emaranhado, enquanto para altos valores de "f", há alteração de cavacos longos para curtos. Quando "ap" é baixo, geralmente, a capacidade de quebra é ruim, para todos os valores de "f".

2.4.4.3- AVANÇO(f):

O avanço é um parâmetro importante na capacidade de quebra, combinado com "ap". Em geral aumentando o "f", há melhora na quebra do cavaco, exceto em pequenas "Vc", devido a possível formação da APC. Em pequenos "ap", a capacidade de quebra não é boa, para todos os valores de "f".

2.4.5- FLUIDO DE CORTE:

Segundo Trent (1984), na zona de aderência o fluido de corte não pode penetrar e sua ação se dá apenas na zona de escorregamento, onde a aderência do material do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta não é completa. A eficiência de um fluido de corte vai depender de sua habilidade em penetrar na região entre o cavaco e a ferramenta, reagir com as superfícies dos mesmos e reduzir a afinidade entre estes materiais, formando um

filme com resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material na interface. Na usinagem com APC, ela pode ser reduzida ou eliminada quando o fluido restringe a aderência do material da peça sobre a ferramenta, reduzindo a área de contato cavaco-ferramenta e conseqüentemente, as forças de usinagem, a geração de calor, e o desgaste das ferramentas, além de uma melhora significativa no acabamento superficial das peças usinadas, Motta (1994).

2.4.6- RIGIDEZ DA MÁQUINA OPERATRIZ:

Em situações em que a máquina não possui uma base adequadamente projetada, ou possui folgas nas guias, durante o processo pode haver vibrações excessivas que promovem a quebra do cavaco, mas em contrapartida compromete a qualidade superficial da peça e a vida da ferramenta.

2.5- MÉTODOS DE CONTROLE DO CAVACO:

2.5.1- DESACELERAÇÃO INTERMITENTE DO AVANÇO:

Este método consiste em se fazer periodicamente a desaceleração do avanço, até valores bem próximos de zero, (Takatsuto 1988), conforme mostra a Figura 2.12.

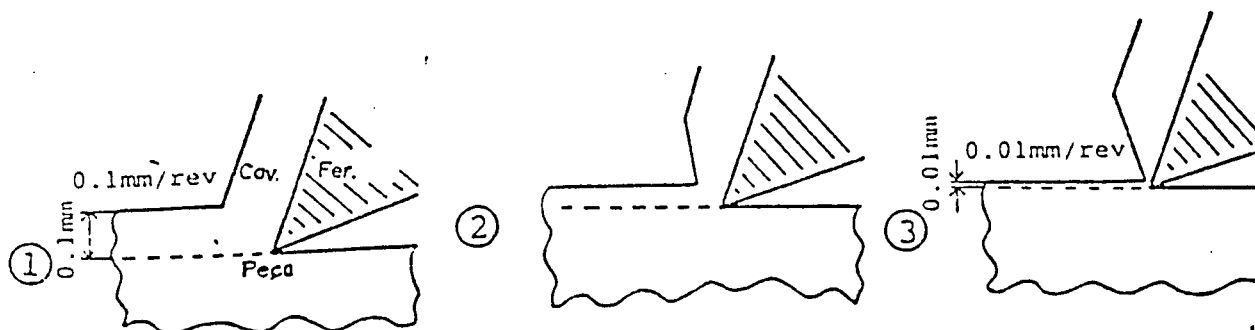


Figura 2.12 - Método da desaceleração intermitente do avanço, (Takatsuto 1988).

Para se conseguir esta desaceleração, utilizou-se de um programa, elaborado em Computador Pessoal ("PC"), acoplado a um CNC. A desaceleração promove a quebra periódica do cavaco devido a redução de espessura de corte a valores próximos de zero. Foram conseguidos melhora na rugosidade superficial, na vida da ferramenta e um pequeno aumento no tempo total de usinagem, em relação ao avanço contínuo convencional. A peça apresenta-se com superfície ligeiramente marcada devido esta variação no avanço.

2.5.2- MÉTODO HIDRÁULICO:

Neste método, o fluido de corte é injetado à alta pressão entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, forçando o cavaco e promovendo a sua quebra, conforme mostrado na Figura 2.13. Este método se mostrou muito eficiente na usinagem de ligas de titânio e de níquel, (Machado 1990).

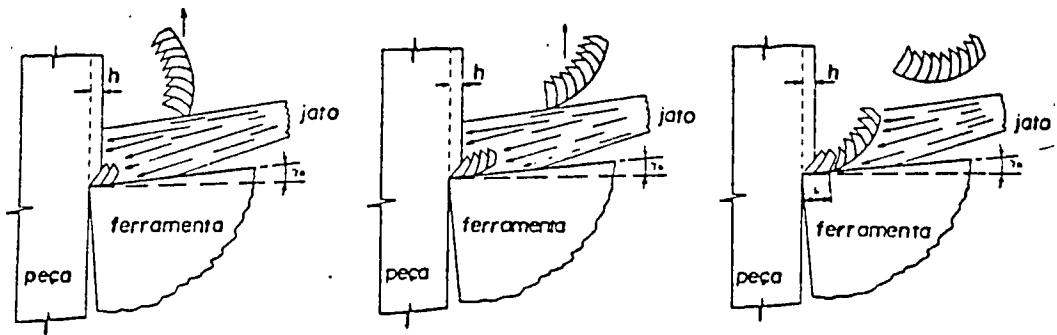


Figura 2.13 - Método hidráulico, para quebra do cavaco, (Machado 1990).

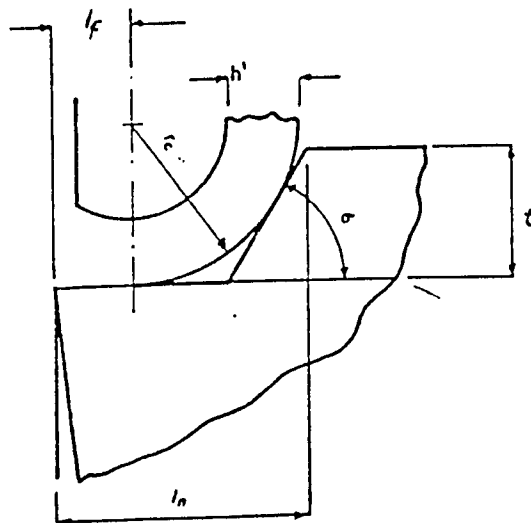
2.5.3- MÉTODO DOS QUEBRA-CAVACOS INSERIDOS NA FERRAMENTA:

Este é o método mais utilizado para se curvar o cavaco e promover a sua quebra. Devido à sua grande importância prática fez-se um sub-ítem para seu estudo.

2.5.3.1- TEORIA DOS QUEBRA-CAVACOS:

Shaw (1984) afirma que quanto menor a espessura do cavaco, estes tornam-se mais flexíveis e difíceis de se quebrar. Os cavacos, que já sofreram deformações intensas durante a sua formação, possuem uma deformação crítica na fratura, ϵ_f , que é diretamente proporcional a h'/r_c . Se r_c não é suficientemente pequeno para promover a fratura para um dado avanço, deve-se aumentar h' ou diminuir r_c . Esta redução pode ser conseguida com o emprego de um quebra-cavaco.

Os quebra-cavacos podem ser postiços ou dando-se uma forma especial à superfície de saída da ferramenta. As geometrias destes quebra-cavacos e as equações do raio de curvatura natural do cavaco, r_c , são representados nas Figuras 2.14, 2.15 e 2.16.

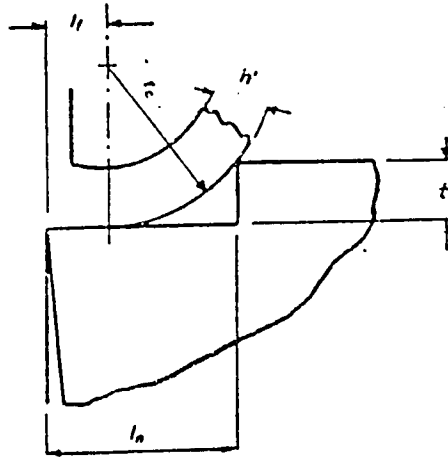


onde:

- l_n - distância do quebra-cavaco da aresta de corte.
- l_f - comprimento de contato cavaco-ferramenta.
- t - altura do quebra-cavaco.
- σ - ângulo da cunha do quebra-cavaco.

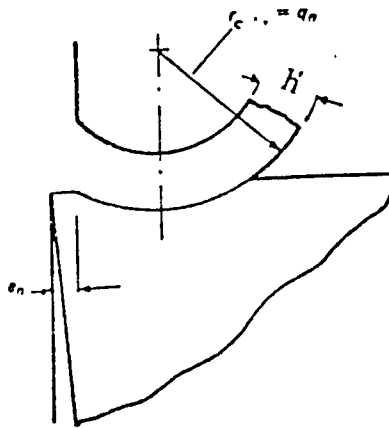
$$r_c = [(l_n - l_f) - (t \cdot \cot \sigma)] \cdot \cot \frac{\sigma}{2} \quad (2.4)$$

Figura 2.14 - Quebra cavaco postiço (Boothroyd 1981).



$$r_c = \frac{(l_n - l_f)^2}{2} + \frac{t}{h'} \quad (2.5)$$

Figura 2.15 - Forma especial na superfície de saída, tipo anteparo (Boothroyd 1981).



onde:

q_n = raio da cratera do quebra-cavaco.

$$r_c = q_n \quad (2.6)$$

Figura 2.16 - Forma especial na superfície de saída, tipo cratera (Boothroyd 1981).

Através de relações trigonométricas, tomando-se as dimensões dos quebra-cavacos, r_c pode ser estimado, mas deve-se garantir uma redução para que o cavaco ao se chocar contra a peça, ou ferramenta ou porta ferramenta, tenha atingido o valor da deformação crítica na fratura, ϵ_f .

Como já mencionado na evolução histórica do controle do cavaco, programas de computador como o CAD e o CAM nos fornece uma flexibilidade ampla no "design" de superfícies de saída de pastilhas com objetivos de se ter o cavaco sob controle em operações de desbaste, intermediárias e de acabamento.

A Figura 2.17 nos mostra algumas geometrias, com faixas de aplicação destas ferramentas.

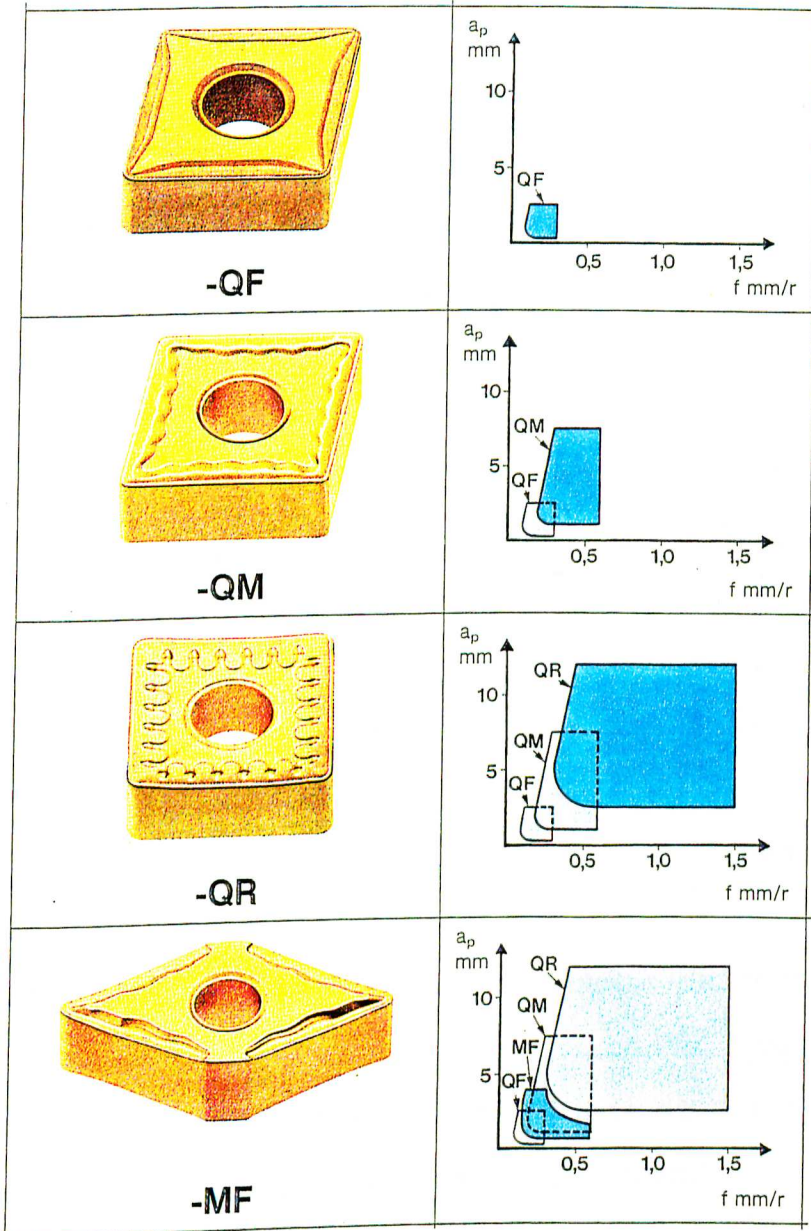


Figura 2.17 - Diversas geometrias de ferramentas (Sandvik 1994).

2.6- CORTE ORTOGONAL:

O corte ortogonal é uma situação bastante específica e simplificada do processo de usinagem. As simplificações são impostas com objetivo de facilitar os estudos de usinagem, e os resultados obtidos são estendidos ao corte tridimensional, com algumas ressalvas. As simplificações são as seguintes:

- Aresta cortante reta, normal às direções de corte e de avanço, tal que a formação do cavaco ocorra num plano normal à aresta cortante (plano de trabalho).

São ainda feitas as seguintes considerações que permitem um tratamento matemático simplificado e que possa ser estendido a outras operações de usinagem, Ferraresi (1977):

- A classe do cavaco formado é contínuo, sem APC;
- Não existe contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça;
- A espessura de corte h (igual ao avanço) é pequena em relação à largura de corte b ;
- A aresta de corte é maior que a largura de corte b ;
- A largura de "b" e a largura do cavaco "b'" são iguais.
- A largura de corte "b" e a profundidade de corte "ap" são iguais.

A Figura 2.18 mostra esquematicamente a representação do corte ortogonal.

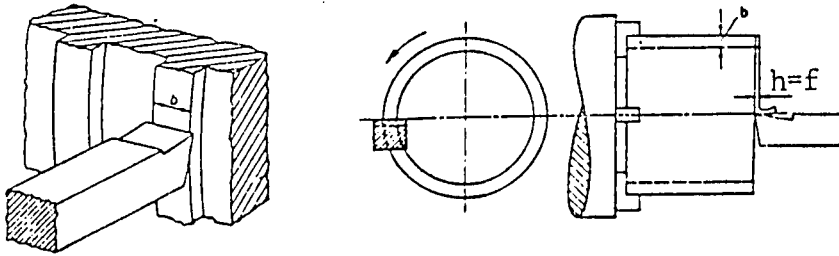


Figura 2.18 - Exemplos de corte ortogonal (Ferraresi 1977).

Neste trabalho o raio de curvatura do cavaco, r_c , será relacionado com as condições de corte e geometria da ferramenta, considerando o corte ortogonal.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todo o trabalho experimental foi executado no Laboratório de Pesquisas em Usinagem - LPU, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

A operação de torneamento, Corte Ortogonal, foi gravada, utilizando-se uma câmera filmadora, um monitor de vídeo e vídeo cassete. Os parâmetros de corte foram previamente estabelecidos e anotados. As imagens gravadas foram reproduzidas através do vídeo cassete, e utilizando-se da função "slow motion" do vídeo, selecionou-se, em cada operação a posição desejada para a medição de r_c e após selecionada, esta imagem é transmitida ao micro computador, no qual está instalado uma placa de aquisição de dados, e um programa de computador que apresenta recursos de fazer medições, entre outros, de áreas, neste caso do círculo que é gerado com o cavaco curvando-se, e a partir deste dado calcula-se o raio de curvatura natural do cavaco.

A Figura 3.1 mostra o diagrama esquemático da montagem dos equipamentos para a filmagem da operação de usinagem.

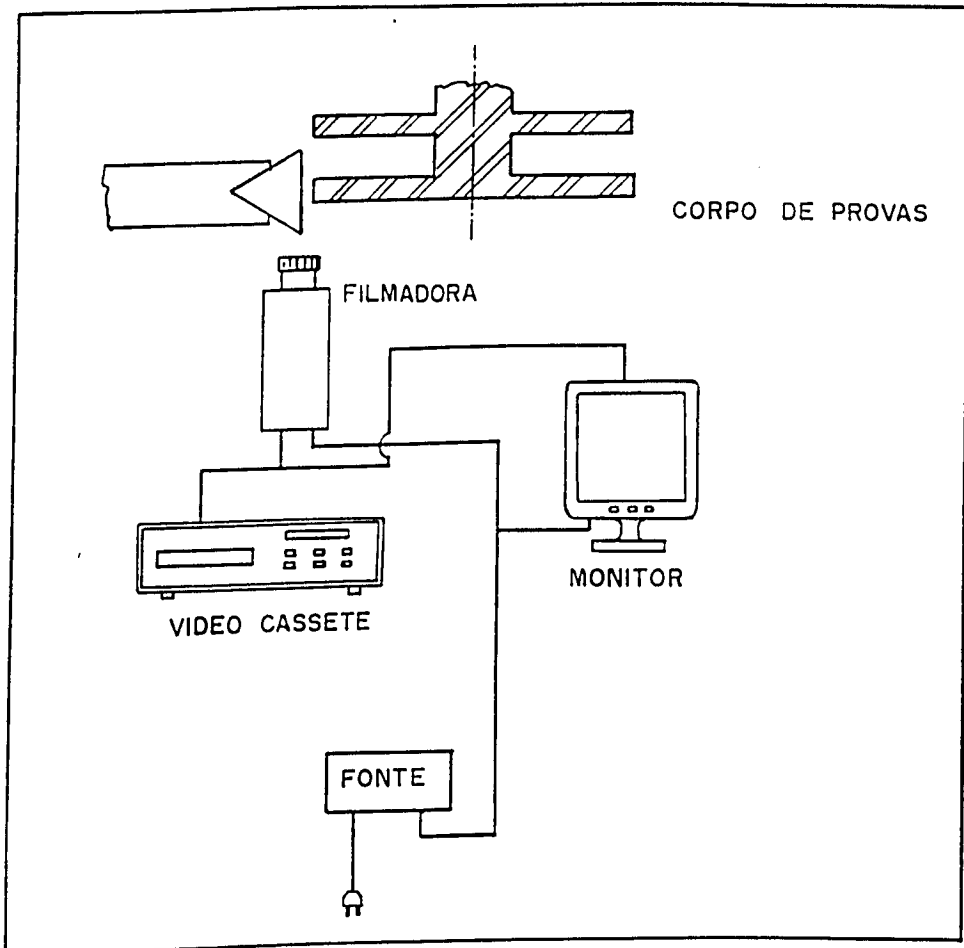


Figura 3.1 - Diagrama esquemático dos equipamentos utilizados na filmagem do corte ortogonal.

A Fig.3.2 mostra um diagrama esquemático do sistema de análise de imagens.

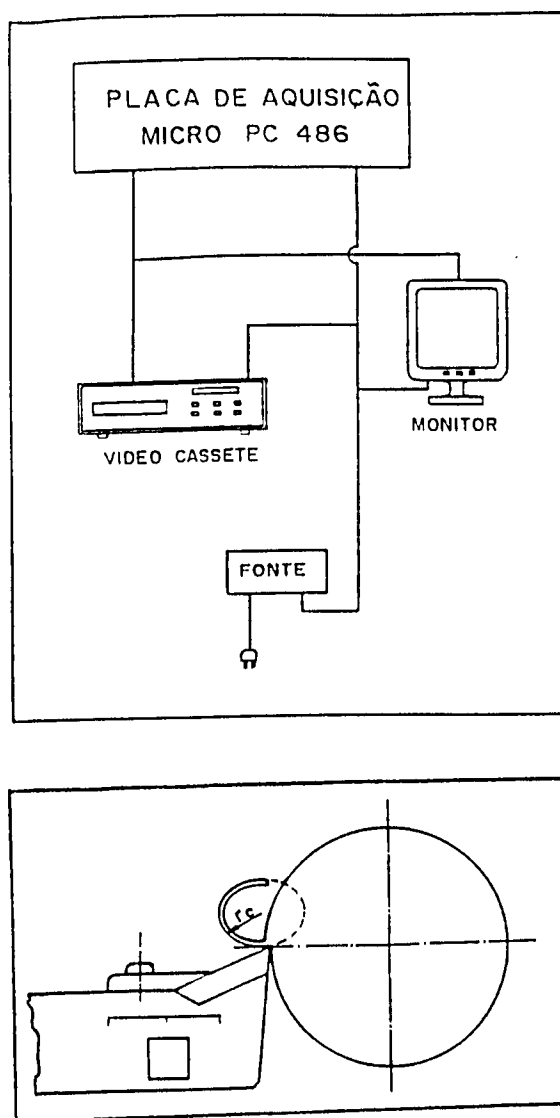


Figura 3.2 - Diagrama esquemático dos equipamentos utilizados na medição de r_c .

3.1- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS:

- Torno mecânico ROMI MAXI II 520 - 6 HP utilizado em todos os testes de retirada de cavaco;
- Filmadora Hitachi KP 110 - CCD;
- Vídeo cassete Sharp 4 cabeças;
- Monitor de TV Hitachi Preto e Branco;
- Microscópio Metalográfico NEOPHOT 21;
- Durômetro universal;
- Micrômetro ISOMASTER 0-25 mm, Resolução 0.01 mm;
- Micro computador 486 DX;
- Programa de computador, Image-Pro PLUS (IPPLUS), utilizado para análise de imagens;

Durante a execução dos experimentos tomou-se os seguintes cuidados:

A) FIXAÇÃO DO PORTA FERRAMENTAS:

A1) Sua fixação foi de forma a não permitir vibrações durante os testes;

A2) Fez-se o nivelamento da aresta de corte da ferramenta triangular em relação ao eixo do corpo de provas, com objetivo de evitar a influência do fluxo lateral do cavaco.

B) FIXAÇÃO DA FILMADORA:

B1) A filmadora foi fixada sobre o barramento do torno mecânico de tal forma que as imagens gravadas durante os testes não apresentassem vibrações e perturbassem as medições do raio de curvatura do cavaco;

B2) Manteve-se a filmadora paralela ao eixo de rotação do corpo de prova.

C) CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO:

Instalou-se na lateral do porta-ferramentas um papel adesivo com uma escala graduada de 20 mm de comprimento, e de um quadrado perfeito de 7 mm de aresta, com objetivo de se fazer a calibração do programa de computador, IPP PLUS, e corrigir as distorções entre as escalas dos eixos X e Y. Este programa analisa imagens, após a sua aquisição, e possui o recurso para calibração.

3.2- MATERIAIS:

3.2.1- AÇO ABNT 5140 (DIN 41Cr4):

Foram utilizadas barras de aço com seção circular, 60 mm de diâmetro. Sua composição química é, (ASM HANDBOOK, 1990): 0.38 - 0.43%C, 0.70-0.90%Mn, 0.035%P, 0.040%S, 0.15-0.35%Si e 0.70-0.90%Cr. A Figura 3.3 mostra uma micrografia de uma seção transversal fotografada no microscópio NEOPHOT 21.

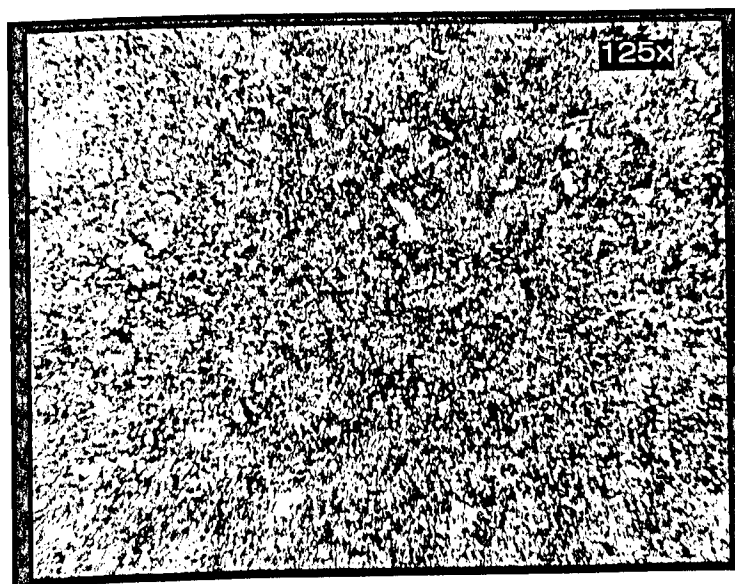


Fig. 3.3 - Micrografia do Aço ABNT 5140.

Fez-se 20 medições de dureza, na seção transversal de uma amostra retirada da barra, conforme Figura 3.4, encontrando o valor médio de HV = 330 kgf/mm². A carga utilizada foi de 10 Kgf aplicada por 30 s.

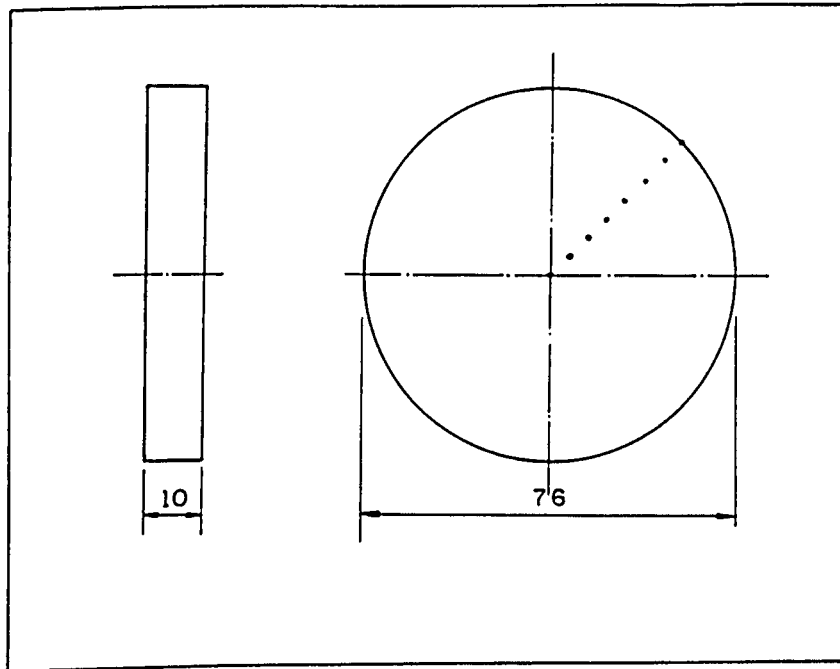


Fig. 3.4 - Seção transversal da barra ilustrando os pontos onde se mediu dureza.

3.2.2- AÇO ABNT 1020:

Utilizou-se de barra de seção circular, 76 mm de diâmetro. De maneira similar ao aço anterior, encontrou-se uma dureza média de HV = 145 kgf/mm².

A composição química é, (ASM HANDBOOK, 1990): 0.18-0.23%C, 0.30-0.60%Mn, 0.040%P (máx.) e 0.050%S (máx.).

A Figura 3.5 mostra uma vista em corte do corpo de prova utilizado nos testes. As disposições das profundidades de corte, para todos os corpos de prova, foi com frequência alterada. Para os dois aços em estudo o comprimento e a profundidade de corte são os mesmos, variando apenas o diâmetro.

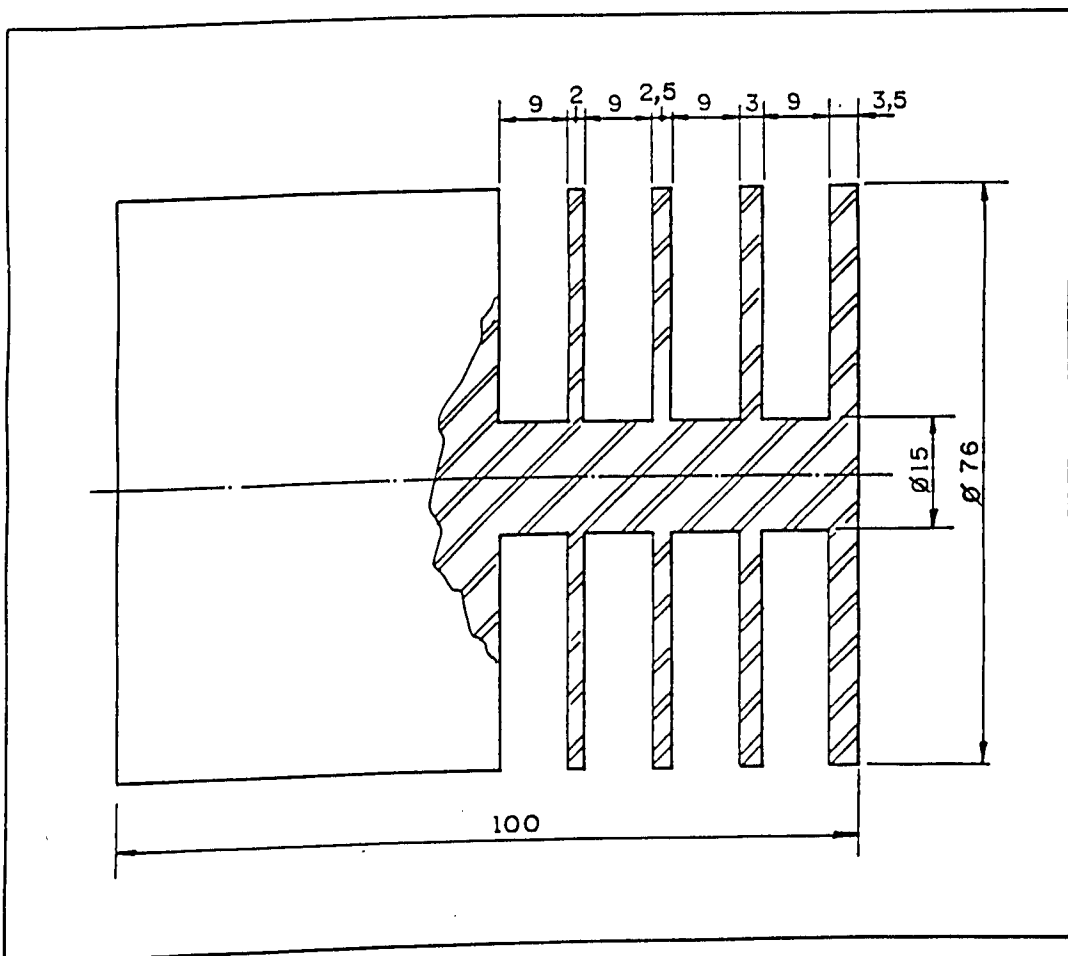


Fig. 3.5 - Vista esquemática do Corpo de Prova para os testes.

3.3 - FERRAMENTAS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DO RAIOS DE CURVATURA NATURAL DO CAVACO, r_c , NO CORTE ORTOGONAL:

Utilizou-se ferramentas lisas, de metal duro, triangulares, 4 mm de espessura, raio de ponta 0.8 mm, especificação TPUN 16 03 08, triplo revestidas (TiC, Al₂O₃, TiN), da classe GC 435, da Sandvik, que cobre a classe ISO P35 e K20. O suporte porta ferramentas, também da Sandvik, tem a seguinte especificação do fabricante 177.9-2009-11.

3.4 - DETERMINAÇÃO DO RAIOS DE CURVATURA NATURAL DO CAVACO (r_c):

Neste trabalho estabeleceu-se relações entre o raio de curvatura natural do cavaco com as condições de corte (V_c , a_p , f e γ_0), para os dois aços em estudo, com o objetivo de se verificar como estes parâmetros interferem, individualmente e em conjunto, em r_c .

Utilizando-se ferramentas triangulares triplo revestidas, no corte ortogonal, montou-se a filmadora sobre o barramento do torno, à distância de 40 cm, e para cada condição do corte, gravou-se a imagem dinâmica do processo, em uma fita de vídeo, utilizando-se do vídeo cassete.

Posteriormente esta imagem filmada foi analisada no "Software", IP PLUS, que é um programa de computador elaborado para fazer análise de imagens. Após adquirida, o programa tem recursos de medir diâmetros de circunferências. Utilizando-se o recurso "Slow motion" do vídeo cassete, tomou-se o cuidado de selecionar

para cada condição de corte, um quadro onde o cavaco ainda não tocou no grampo do suporte, nem na peça, e mediu-se o seu raio de curvatura. Para o aço ABNT 1020 foram executadas 443 condições de corte distintas (ver Anexo 1). Para o aço ABNT 5140, o número de condições de corte foi de 310 (ver Anexo 2). Informações sobre o analisador de imagens e da filmadora estão no Anexo 3.

3.5 - CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADAS:

3.5.1 - AÇO ABNT 1020:

"Vc" entre 74 e 334 m/min;
"ap" entre 1.1 e 4 mm;
"f" entre 0.066 e 0.313 mm/rot;
"γ" entre 3 e 18°;
Sem fluido de corte.

3.5.2 - AÇO ABNT 5140:

"Vc" entre 34 e 264 m/min;
"ap" entre 1.5 e 3.0 mm;
"f" entre 0.066 e 0.418 mm/rot;
"γ" entre 3 e 18°;
Sem fluido de corte.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - AÇO ABNT 1020

Os resultados de r_c medidos estão apresentados no Anexo 1.

Fez-se ajustes de funções dos pontos encontrados experimentalmente, e calculou-se o erro dado pela seguinte expressão:

$$\text{erro} = 100 * (\sum_i (r_{ci}^t - r_{ci}^r)^2) / \sum_i (r_{ci}^r)^2 \quad (4.1)$$

onde r_{ci}^t é o valor do raio de curvatura teórico encontrado através do polinômio de ajuste,

r_{ci}^r é o real encontrado nos experimentos.

Com interpolação linear o erro encontrado foi de 24.75%, e com uma interpolação de segundo grau foi de 19.84%.

O polinômio que melhor se ajustou aos pontos distribuídos, foi o de uma interpolação polinomial de grau três, que é apresentado no Anexo 4, com este polinômio, o erro calculado foi de 14.75%.

Interpolação com polinômio de grau 4 não melhorou de forma significativa os resultados.

O erro encontrado é considerado satisfatório por se tratar de um fenômeno ainda não equacionado, e por ainda não se ter um modelo bem definido para seu estudo.

Através de análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos no processo, utilizando-se do programa de computador desenvolvido por Duarte (1994), verifica-se a sensibilidade adimensional, que nos mostra a influência de forma quantitativa de cada parâmetro, no raio de curvatura do cavaco são:

$$f = 2.6780; \quad ap = 7.2930; \quad \gamma = 2.5519; \quad vc = 0.7082$$

Os valores singulares da matriz de sensibilidade adimensional (Equação 4.2), foram:

$$214.6782; \quad 80.7341; \quad 34.0854; \quad 11.2028.$$

$$S_{ji} = \left| \frac{P_i \cdot \partial r_{c_j}}{r_{c_j} \cdot \partial P_i} \right| \quad (4.2)$$

Onde,

S_{ji} é a matriz de sensibilidade adimensional de r_c em função dos parâmetros de usinagem P ;

P_i é o i -ésimo parâmetro de usinagem,

e r_{c_j} é o valor do raio de curvatura natural do cavaco para cada linha da matriz (para este aço $i=5$ e $j=443$).

Estes valores medem a independência linear em relação aos parâmetros, e se a razão entre o maior e o menor valor singular for menor do que 1000, as variáveis são totalmente independentes, pois todas apresentam forte influência no fenômeno, (Duarte, 1994), no

caso, no raio de curvatura do cavaco, r_c .

Utilizando-se do polinômio ajustado, verifica-se o comportamento do raio de curvatura do cavaco com relação à variação de um parâmetro, mantendo-se os demais constantes.

A Figura 4.1 mostra $r_c \times a_p$; A Figura 4.2 mostra $r_c \times f$;

A Figura 4.3 mostra $r_c \times \gamma$ e a Figura 4.4 mostra $r_c \times V_c$, que são exemplos destes comportamentos de r_c .

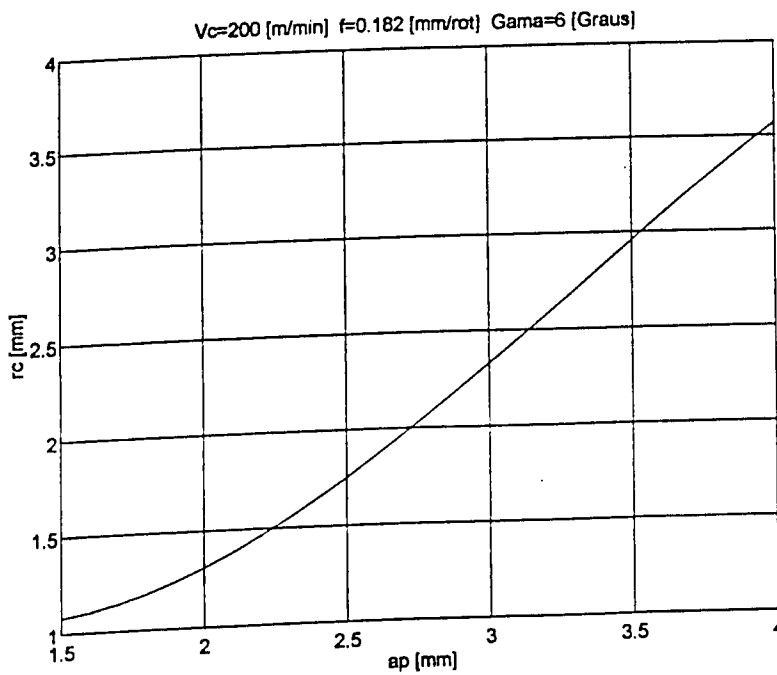


Figura 4.1 - Variação de r_c com a_p .

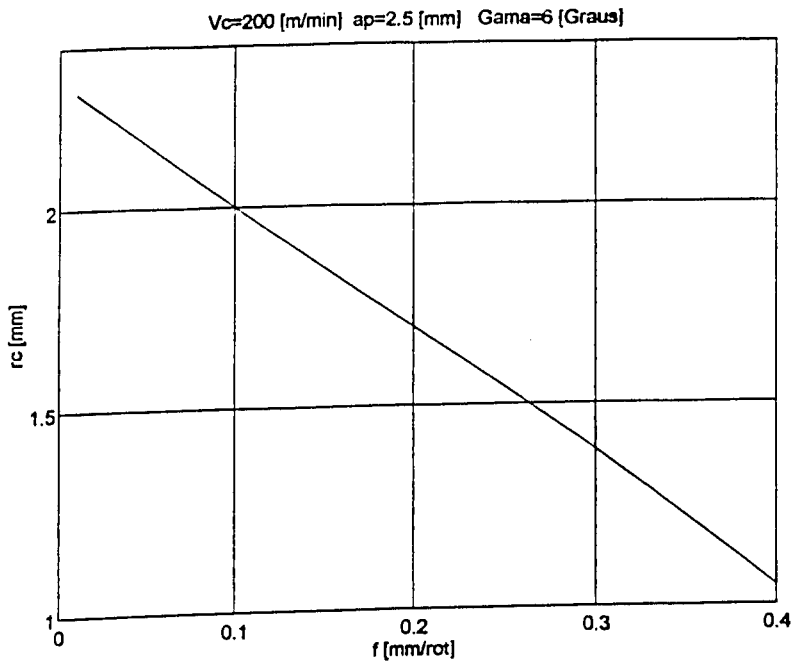


Figura 4.2 - Variação de r_c com f .

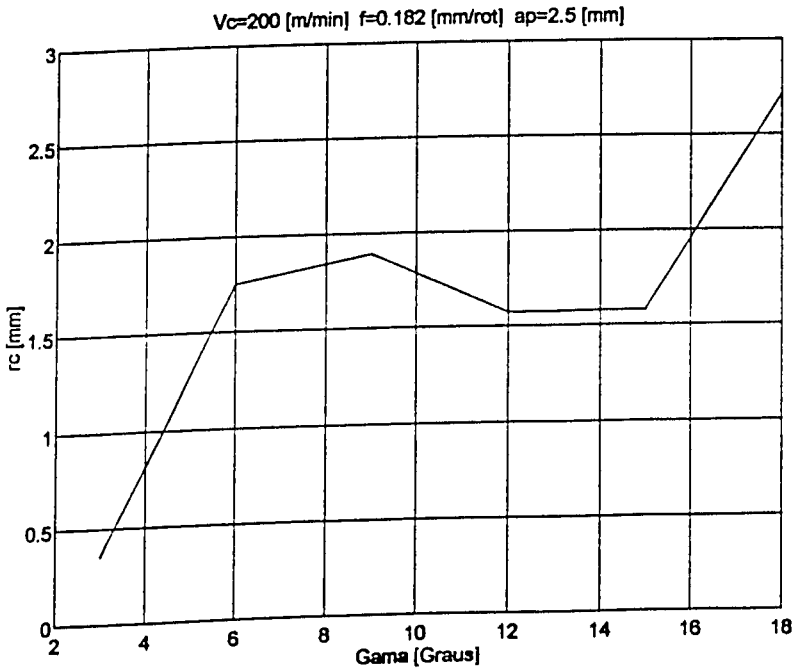


Figura 4.3 - Variação de r_c com γ .

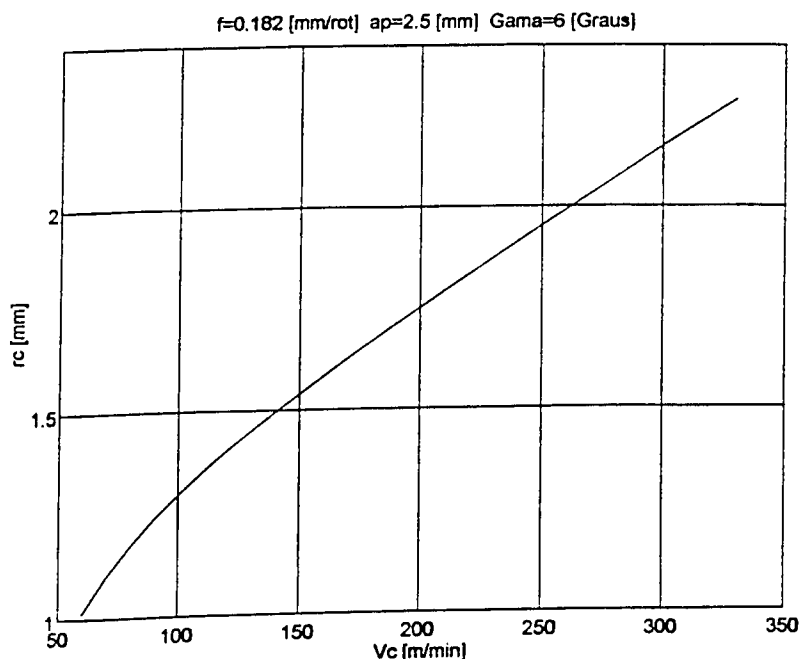


Figura 4.4 - Variação de r_c com V_c .

A Figura 4.1 mostra que com o aumento da profundidade de corte, a_p , o raio de curvatura do cavaco, r_c , aumenta, ou seja, considerando-se que o aumento de r_c torna o cavaco mais difícil de ser quebrado (conforme apresentado no item 2.5.3.1 - Teoria dos Quebra-Cavacos), há tendência de formação de cavacos mais longos com o aumento de " a_p ". Fang e Jawahir (1990), encontraram resultados equivalentes usinando aços AISI 1020, AISI 1040 e AISI 4140, utilizando ferramentas TNMG160408, e três diferentes geometrias de quebra cavacos, ENZ, ENA e ENT, com valores de $f=0.1$ mm/rot. Os resultados se inverteram para $f=0.3$ mm/rot. Ainda segundo estes autores os demais parâmetros (V_c e geometria da ferramenta) podem alterar o comportamento de r_c .

A Figura 4.2 mostra que com o aumento do avanço, f , há uma redução na curvatura do cavaco, r_c , ou seja melhora-se a capacidade de quebra dos cavacos. Estes resultados também foram observados por Fang e Jawahir (1990). Eles observaram que para $V_c \leq 50$ m/min, este comportamento se inverte, devido a uma possível formação da Aresta Postiça de Corte (APC), e em baixos "ap" ($ap = 1$ mm), r_c apresenta tendência de aumentar, dificultando a quebra do cavaco.

A Figura 4.3 mostra que com o aumento do ângulo de saída da ferramenta, γ_0 , o raio de curvatura do cavaco, r_c , apresenta tendência de aumentar, principalmente para γ_0 menores que 6° e maiores que 15° . Verifica-se, também que para γ_0 compreendidos entre estes valores, r_c praticamente não é influenciado. O aumento da capacidade de quebra do cavaco, para materiais não demasiadamente tenazes, pode ser obtido através do aumento da deformação do cavaco no plano de cisalhamento primário, Ferraresi (1977), que pode ser obtido, entre outros fatores, através da diminuição do ângulo de saída e de inclinação da ferramenta, ou o emprego de ambos com valores negativos. Isto explica os resultados aqui obtidos. A quantidade de deformação do cavaco pode não ter sido suficientemente influenciada por γ_0 no intervalo de 6° e 15° .

A Figura 4.4 mostra que com o aumento da velocidade de corte, V_c , o raio de curvatura do cavaco, r_c , apresenta a tendência de aumentar. Fang e Jawahir (1990), e Ferraresi (1977) encontraram resultados similares. Eles afirmam que há tendência dos cavacos tornarem-se mais finos e longos, com o aumento de V_c , dificultando a sua quebra, e em $V_c \geq 150$ m/min, esta já não influencia

consideravelmente r_c .

Através da análise dos valores de sensibilidade adimensional, verifica-se que os parâmetros avaliados que apresentaram maiores influências, no raio de curvatura, r_c , em ordem decrescente são:

ap, f, γ e Vc.

De forma quantitativa "ap" tem 55.1% de influência, "f" 20.2%, " γ " 19.3% e "Vc" 5.4%

Calculando-se os valores singulares da matriz de sensibilidades, (Beck 1977), verifica-se que a ordem de magnitude destes valores indicam que todos os parâmetros são linearmente independentes, já que a razão entre o maior e o menor valor é menor que 1000, ou seja: todos tem forte influência sobre r_c .

4.2 - AÇO ABNT 5140 (DIN 41Cr4)

Os Resultados obtidos estão apresentados no Anexo 2.

Fez-se ajustes de funções dos pontos encontrados experimentalmente, e calculou-se o erro de maneira idêntica ao apresentado no item anterior. Com uma interpolação linear o erro encontrado foi de 21.68%, e com uma interpolação do segundo grau foi de 17.93%.

O polinômio que melhor se ajustou aos pontos aleatoriamente distribuídos, foi uma interpolação polinomial de grau três, que apresentou um erro de 12.39%. O Anexo 5 apresenta este polinômio.

Interpolação com polinômio de grau quatro, não abaixou o erro mais que 0.5%.

As sensibilidades adimensionais são:

$$f = 2.7250; \quad ap = 21.4907; \quad \gamma = 15.3086 \quad e \quad Vc = 2.2825.$$

Os valores singulares da matriz de sensibilidade adimensional foram:

$$537.5845; \quad 127.9248; \quad 80.1836 \quad e \quad 13.7569.$$

Através da análise da sensibilidade adimensional (Duarte, 1994), verifica-se que os parâmetros avaliados que apresentam maiores influências, em ordem decrescente de influência são:

ap, γ , f e Vc.

De forma quantitativa "ap" tem 51.4% de influência,, " γ " tem 36.6%, "f" tem 6.5% e Vc tem 5.5%

Através da análise dos valores singulares, (Beck, 1977), verifica-se que a relação entre o maior e o menor valor é menor que 1000, ou seja os parâmetros são totalmente independentes, ou seja, todos apresentam forte influência no raio de curvatura do cavaco, r_c , e não devem ser analisados separadamente.

A Figura 4.5 mostra $r_c \times ap$; A Figura 4.6 mostra $r_c \times f$;

A Figura 4.7 mostra $r_c \times \gamma$; A Figura 4.8 mostra $r_c \times Vc$,

que são exemplos destes comportamentos de r_c .

$f=0.182$ [mm] $g=6$ [graus] $V_c=200$ [m/min]

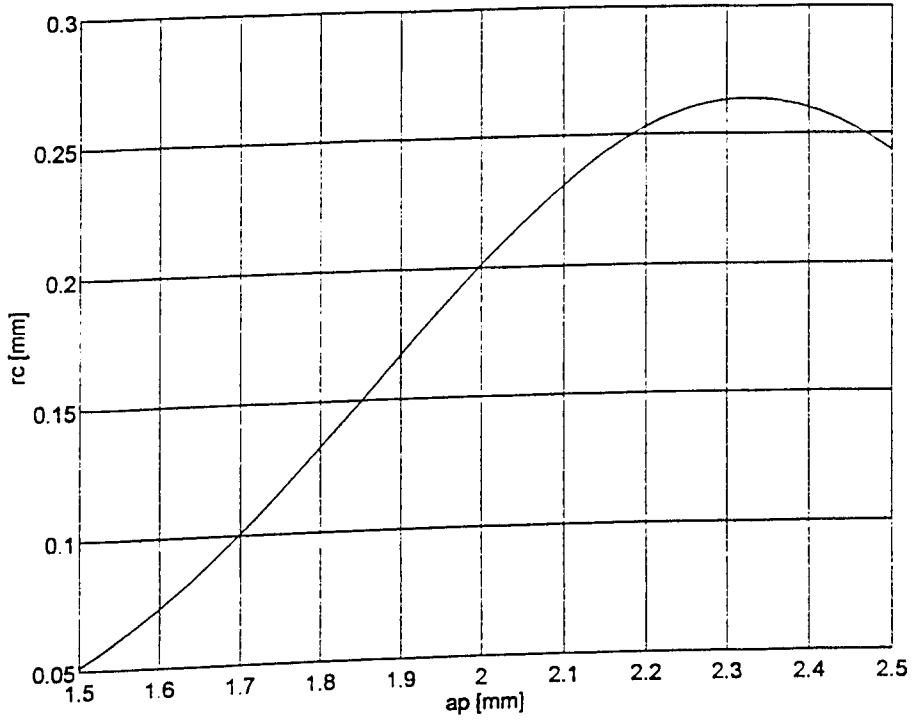


Figura 4.5 - Variação de r_c com a_p .

$a_p=2.0$ [mm] $V_c=155$ [m/min] $g=6$ [Graus]

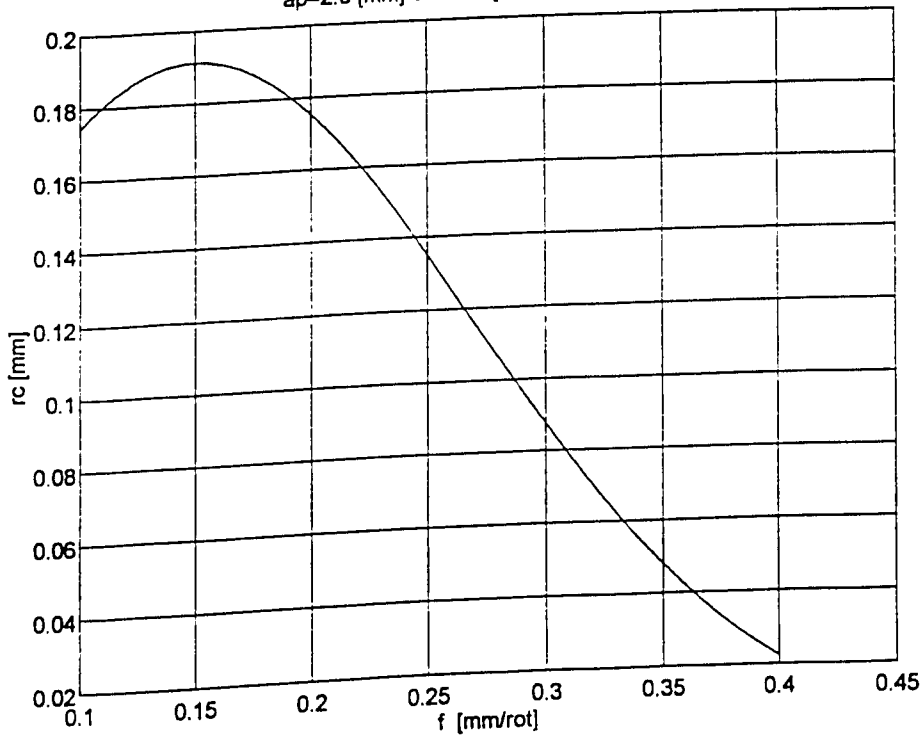


Figura 4.6 - Variação de r_c com f .

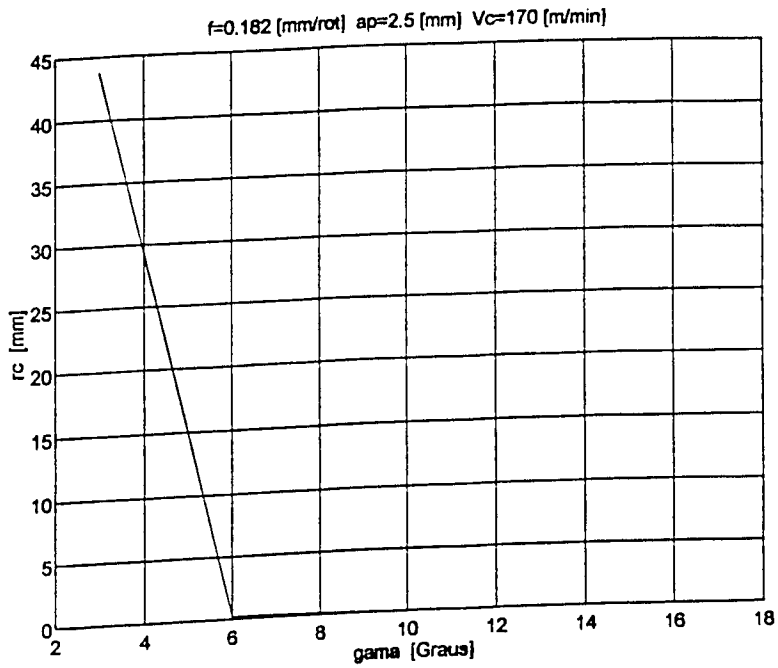


Figura 4.7 - Variação de r_c com γ .

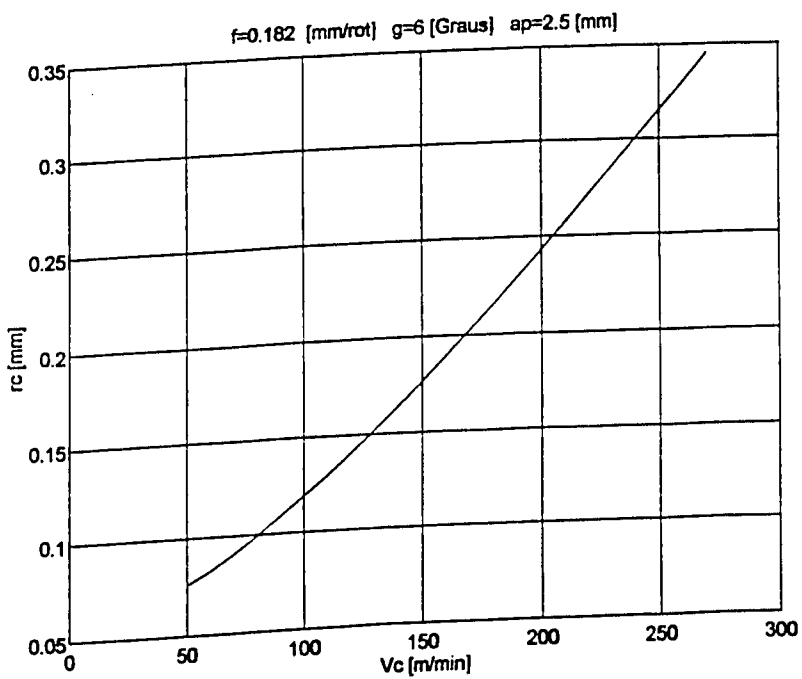


Figura 4.8 - Variação de r_c com V_c .

A Figura 4.5 mostra que com o aumento da profundidade de corte, a_p , entre 1.5 e 2.3 mm, há aumento de r_c , entre 3.0 e 3.5 mm há diminuição de r_c . Esta queda, na curva, pode ser assumida por uma possível influência destes pontos estarem na extremidade do universo de amostragem, (Duarte, 1994).

A Figura 4.6 mostra que aumentando o avanço, f , há uma diminuição de r_c .

A Figura 4.7 mostra que aumentando o ângulo de saída, γ , há diminuição r_c de 3° até 6° e a partir deste valor r_c é praticamente nulo.

A Figura 4.8 mostra que aumentando a velocidade de corte, V_c , há aumento de r_c .

Através do "software" "STATGRAPHICS", que faz análise de correlação total e parcial entre os parâmetros, Anexo 6, verifica-se que o parâmetro mais influente é V_c , seguido de f , γ e de a_p . Observa-se ainda, que com o aumento de V_c e de γ , há aumento de r_c , e com o aumento de f e de a_p , r_c diminui. O mesmo fato foi observado pelo ajuste de primeira ordem, mas o erro para este ajuste é maior que para os de segundo e terceiro graus.

A Figura 4.9 mostra a variação de $r_c \times \gamma$, feito por um ajuste de 1° grau.

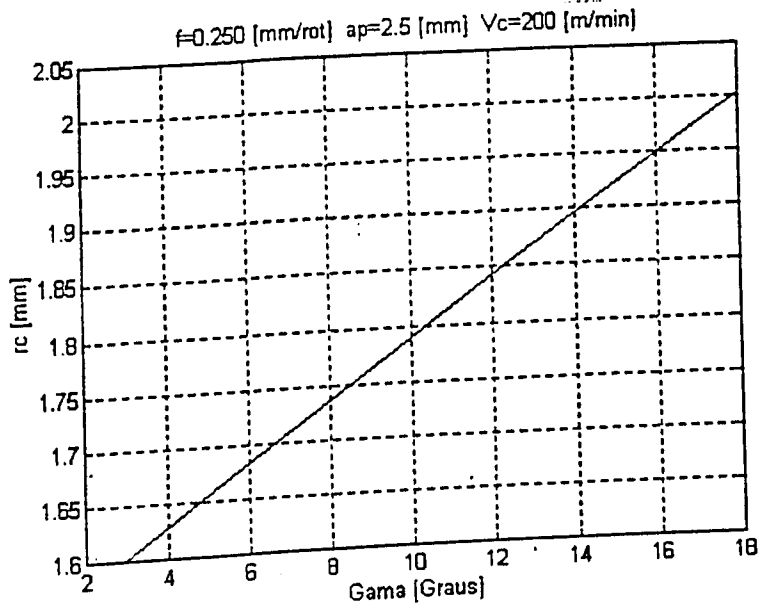


Figura 4.9 - Variação de r_c X γ , ajuste com polinômio de 1°. grau.

A Figura 4.10 mostra a variação de r_c X γ , feito por um ajuste de segundo grau.

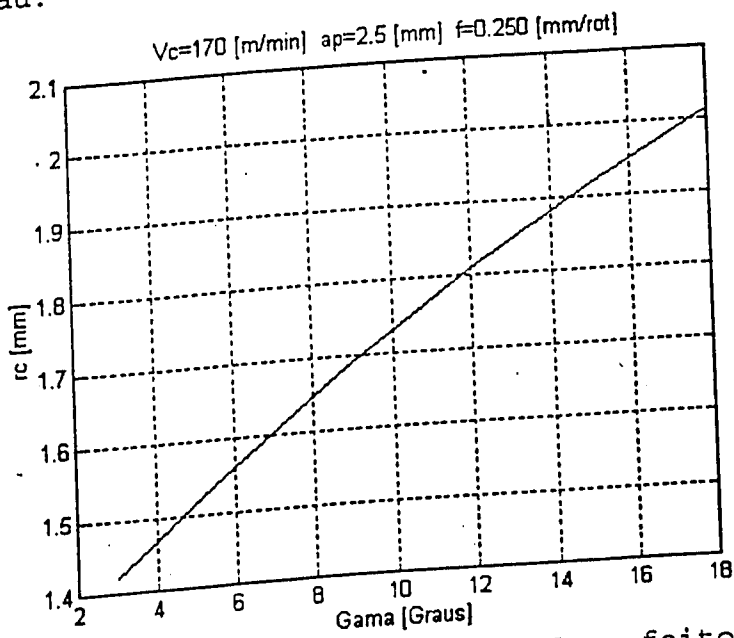


Figura 4.10 - Variação de r_c X γ , feito com polinômio de 2°. grau.

de 2°. grau.

O Anexo 8 apresenta o programa feito para traçar o gráfico, para o Aço ABNT 5140, de $r_c \times \gamma$, para uma interpolação linear.

O Anexo 9 apresenta o programa feito para traçar o gráfico, para o Aço ABNT 5140, de $r_c \times \gamma$, para uma interpolação de segundo grau.

A medição do raio de curvatura natural do cavaco, seguindo os procedimentos experimentais e através da técnica empregada, permitiu relacionar " r_c ", com os principais parâmetros do processo.

Não foram encontradas, na literatura, publicações de nível científico, que tenha investigado e tentado relacionar o raio de curvatura natural do cavaco com os parâmetros aqui considerados.

A técnica empregada, entretanto, não é perfeita. Alguns fatores são enumerados abaixo como possíveis fontes de erros, que na presente investigação foram amenizados pelo grande volume de testes realizados. São eles:

- a) Velocidade de geração da imagem pequena. Muito embora com outros objetivos, Yao e Jawahir (1990), em seus estudos, sugere que a filmadora deve ser capaz de gerar pelo menos 1000 quadros/s.
- b) Programa analisador com maior sensibilidade na aquisição das imagens, já que são adquiridas e não se mantêm estáticas (ficam vibrando e dificultando a medição);
- c) Dificuldades em se selecionar a "pose" que se deseja medir a curvatura, já que a formação do cavaco apresenta um período que oscila de 3 à 26 ms, dependendo da velocidade de corte, (Yao e Jawahir 1990).

Além disso não foram considerados outros parâmetros que podem interferir no raio de curvatura do cavaco como: força de usinagem, temperatura de corte, fluido de corte, desgastes da ferramenta de corte, vibrações na máquina ferramenta e no suporte porta-ferramentas.

Na análise de influência de γ sobre r_c , Figuras 4.9 e 4.10, observou-se que para os ajustes linear e de segundo grau, r_c aumentou com o aumento de γ , conforme esperado, (Ferraresi, 1977) e já observado para o Aço ABNT 1020. Porém para o melhor ajuste, o comportamento de r_c em função de γ , foi mostrado na Figura 4.7. Esta discrepância de resultados, mostra claramente que com o aumento do número de graus de liberdade do ajuste, houve uma combinação de coeficientes ligados a "f", "ap", " γ " e "Vc" de maneira a minimizar os erros advindos de parâmetros não medidos no universo de condições de corte sob análise.

O Anexo 7 apresenta o programa feito para traçar o gráfico, para o Aço ABNT 1020, de r_c X ap, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Para os outros gráficos deste aço e para o aço ABNT 5140, os programas são similares, alterando-se apenas os coeficientes do polinômio e os valores fixados das constantes.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

- A técnica empregada permitiu equacionar a curvatura do cavaco com os demais parâmetros investigados, com razoável confiabilidade, embora presente as fontes de erro, quanto a limitações da filmadora e do analisador de imagens. Entretanto trata-se de uma técnica inovadora pois não foram encontradas na literatura trabalhos similares.
- A análise de sensibilidade utilizada mostrou, nestas investigações, para o Aço ABNT 1020, que a profundidade de corte, seguida do avanço, do ângulo de saída e da velocidade de corte, apresentam-se em ordem decrescente de influências.
- A análise de sensibilidade aplicada ao Aço ABNT 5140, mostra que a profundidade de corte, seguida do ângulo de saída da ferramenta, do avanço e da velocidade de corte, apresentam-se em ordem decrescente de influências.

- O raio de curvatura do cavaco, para o Aço ABNT 1020, aumenta com o aumento da profundidade de corte, do ângulo de saída da ferramenta e da velocidade de corte, e diminui com o aumento do avanço.
- O raio da curvatura do cavaco, para o Aço ABNT 5140, apresenta tendência de aumentar com o aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte, diminuir com o aumento do avanço e do ângulo de saída da ferramenta, entre 3° e 6° , mantendo-se praticamente constante acima de 6° .
- A análise dos valores singulares, aplicada aos dois aços, mostra que os parâmetros são linearmente independentes e todos apresentam forte influência no raio de curvatura do cavaco, e não devem ser analisados separadamente.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para o Aço ABNT 1020 os resultados encontrados estão coerentes com estudos já realizados e, inclusive mencionados nas Referências, mas para o Aço ABNT 5140 os resultados não estão de acordo com o esperado, quanto ao ângulo de saída da ferramenta, considerando os aspectos teóricos, até então esperados para o fenômeno. Sugere-se, fazer mais testes incluindo outros parâmetros, que neste trabalho não foram considerados, como por exemplo: temperatura e força de corte, desgaste de flanco e de cratera da ferramenta, vibrações no sistema máquina-ferramenta e suporte porta-ferramentas. Através da análise dos Valores Singulares e das Sensibilidades Adimensionais verificar, possíveis parâmetros que poderiam ser desconsiderados, e refazer o modelo matemático que melhor se adequa ao fenômeno em estudo.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAKI, T.; YAMAMOTO, S. and NAKAJIMA, H. (1985); "Improvement of Chip disposability of Ferritic Steels By Containing Martensitic Microstructures", Proc. Int. Conf. on High Prod. Mach., Mat. Proc., New Orleans, Louisiana, USA, Pub. by ASM.

ASM HANDBOOK (1990) ; "Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys", Metals Handbook, Vol. 1, USA, Pub. by ASM.

BECK, J. V. and ARNOLD, K. J. (1977); "Parameter Estimation in Engineering Science", John Wiley, New York.

BONIFÁCIO, M. E. R. and DINIZ, A. E. (1994); "Correlating Tool Wear, Tool Life, Surface Roughness and Tool Vibration in Finish Turning with Coated Carbide Tools", Wear, 173, p. 137-144.

BOOTHROYD, G. (1981); "Fundamentals of Metals Machining an Machine Tools", International Student Edition, McGraw Hill, 5th Printing, ISBN 0-7-085057-7.

- COOK, N. H. and FINNIE, I. and SHAW, M. C. (1954); "Discontinuous Chip Formation", Transactions of the ASME, p. 153-162.
- COOK, N. H.; JHAVERI, P. and NAYAK, N. (1963); "The Mechanism of Chip Curl and Importance in Metal Cutting", Transactions of the ASME, p. 374-380.
- DUARTE, M. A. V. (1994); "Ajuste de Modelos Dinâmicos de Estruturas com não Linearidades Concentradas", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- FANG, X. D. and JAWAHIR I. S. (1990); " An Expert System Based on a Fuzzy Mathematical Model for Chip Breakability Assessments in Automated Machining", Proc. Int. Conf., ASME, Manufacturing International 90, Vol.IV, ASME Publ., Atlanta, GA, p. 31-37
- FANG, X. D. and JAWAHIR, I. S. (1993); "The Effects of Progressive Tool Wear an Tool Restricted Contact on Chip Breakability in Machining", Wear, Vol. 160, p. 243-252.
- FERRARESI, D. (1977); "Fundamentos da Usinagem dos Metais", São Paulo, Edgard Blucher.

FORM, G. W., and BEGLINDER, H. (1970); "Fundamental Considerations in Mechanical Chip Formation", Annals of the CIRP, Vol.XVIII p. 153-167.

ISO (1977); "Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools", ISO 3685.

JAWAHIR, I. S. (1988a); " A Survey and Future Predictions for the Use of Chip Breaking in Unmanned Systems", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 3 (4), 87-104, IFS Publications, 0268-3763.

JAWAHIR, I. S. (1988b); "The Chip Control Factor in Machinability Assessments: Recent Trends", Journal of Mechanical Working Technology, 17, p. 213-224.

JAWAHIR, I. S., and LUTTERVELT, C. A. (1993); "Recent Developments in Chip Control Research and Applications", Annals of the CIRP Vol. 42/2, p. 659-693.

KANE, G. E. (1987); "An Approach to the Breaking of Chips", Proc. of a Conf. on Advances in Tool in Mat. for Use in HSM, Scottsdale, Arizona, USA, Pub. ASM, p. 29-37.

- KOMANDURI, R.; von TURKOVICH, B. F. (1981); "New Observation on the Mechanics of Chip Formation when Machining Titanium Alloys", Wear, Vol. 69, p. 179-188.
- KOMANDURI, R. and BROWN, R. H. (1981); "On the Mechanics of Chip Segmentation In Machining", Journal of Engineering for Industry, Vol.103, p. 33-51.
- KOMANDURI, R.; SHROEDER, T. A.; HARZA, J. and von TURKOVICH, B. F. and FLOM, D. G. (1982); "On the Catastrophic Shear Instability in High Speed Machining of an AISI 4340 Steel", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.104, p. 121-131.
- KOMANDURI, R. and SHROEDER, T. A. (1986); "On Shear Instability in Machining a Nickel-Iron Base Superalloy", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.108, p. 93-100, p.93-100.
- LE MAIRE, J. C. and BACKOFEN, W. A. (1972); "Adiabatic Instability in Orthogonal Cutting of Steel", Metal Trans., Vol.3, p. 477-481.
- LEE, D. (1985); " The Effect of Cutting Speed on Chip Formation Under Orthogonal Machining", Journal of Engineering for Industry, Vol.107, p. 55-63.

- MACHADO, A. R. (1990);** "Machining of Ti 6 Al 4 V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System", PhD Thesis, University of Warwick, England, p. 288.
- MACHADO, A. R. e SILVA, M. B. (1993);** "Usinagem dos Metais", Departamento de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia-MG.
- MILOVIK, R.; WALLBANK, J.(1983);** " The Machining of Low Carbon Free Cutting Steels with High Speed Steel Tools", The Machinability of Engineering Materials, ASM, p.23-41.
- MOTTA, M. F. (1994);** "Influência do Fluido de Corte no Torneamento do Aço ABNT 8640", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- NAKAYAMA, K.; SHAW, M. C. and BREWER, R. C. (1966);** "Relationship Between Cutting Forces, Temperatures, Built-up Edge and Surface Finish", Annals of the CIRP, Vol.XIV, p. 211-223.
- NEDEß, C. and HINTZE, W. (1989);** "Characteristic Parameters of Chip Control in Turning Operations with Indexable Inserts and Three-Dimensionally Shaped Chip Formers", Annals of the CIRP, Vol. 38/1, p.75-79.

RECHT, R. F. (1964); "Catastrophic Thermoplastic Shear", Trans ASME, Journal Applied Mechanics, p. 189-193.

SANDVIK Coromant (1994); "Herramientas de Tornear", Catálogo Sandvik.

SHAW, M. C.; BER, A. and MAMIN, P. A. (1960); "Friction Characteristics of Sliding Surfaces Undergoing Subsurface Plastic flow", Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol.82, p. 342-346.

SHAW, M. C.; BER, A.; MAMIN, P. A. (1960); "Friction Characteristics of Sliding Surfaces Undergoing Subsurface Plastic Flow", Trans ASMS, J. Basic Eng., Vol. 82, p. 342-346.

SHAW, M. C. (1984); "Metal Cutting Principles", Oxford University Press,, ISBN 0-19-859002-4.

STATGRAPHICS (1987); "Statistical Graphics System by Statistical Graphics Corporation", USERS GUIDE, STSC, Inc. USA.

TAKATSUTO, M. (1988); "Chip Disposal System in Intermittently Decelerated Feed", Bull Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 22, Nº 2, p. 109-114.

TRENT, E. M. (1963); "Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools - Part II: Conditions of Seizure at the Tool/Work Interface", Journal of the Iron and Steel Institute, p. 923-932.

TRENT, E. M. (1984); "Metal Cutting", 2a. ed., London, Butterworths, ISBN 0-408-10856-8.

TRENT, E. M. (1988a); "Metal Cutting and the Tribology of Seizure.

I- Seizure in Metal Cutting", Wear, 128, p. 29-45.

TRENT, E. M. (1988b); "Metal Cutting and the Tribology of Seizure.

II-Movement of Work Materials Over the Tool in Metal Cutting" ,Wear, 128, p. 47-64.

TRENT, E. M. (1988c); "Metal Cutting and the Tribology of Seizure.

III- Temperatures in Metal Cutting", Wear, 128, p. 65-81.

WILLIAMS, J. E.; ROLLANSON, E. C. (1970); "Metallurgical and Pratical Machining Parameters Affecting Built-up Edge Formation in Metal Cutting", J Inst Metals, Vol.98, pp. 144-153.

WRIGHT, P. K. (1981); "Frictional Interactions in Machining: Comparisons Between Transparent Sapphire and Steel Cutting Tools", *Metals technology*, p. 150-160, 1981.

ZOREV, N. M. (1963); "Interrelationship Between Shear Process Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting", *Proc. Int. Prod. Eng. Res. Conf.*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, p. 42-49.

ANEXO 1

CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADAS E VALORES MEDIDOS DE r_c PARA O AÇO
ABNT 1020

TESTE Nº	f [mm/rot]	ap [mm]	γ [Graus]	Vc (m/min)	r_c [mm]
1	.114	1.2	6	334	6.70
2	.114	1.2	6	315	6.20
3	.114	1.2	6	292	5.10
4	.114	1.2	6	269	4.80
5	.114	1.2	6	204	4.10
6	.114	1.2	6	176	4.40
7	.114	1.2	6	142	2.50
8	.114	1.2	6	112	3.20
9	.114	1.2	6	90	2.50
10	.114	1.2	6	334	7.50
11	.114	1.2	6	312	6.50
12	.114	1.2	6	280	6.02
13	.114	1.2	6	254	5.90
14	.114	1.2	6	219	5.80
15	.114	1.2	6	190	4.10
16	.114	1.0	6	160	3.20
17	.114	1.0	6	124	2.60
18	.114	1.0	6	95	2.50
19	.114	1.2	6	334	7.90
20	.114	1.2	6	313	7.80
21	.114	1.2	6	307	12.50
22	.114	1.2	6	276	6.80
23	.114	1.2	6	255	5.80
24	.114	1.2	6	228	4.40
25	.114	1.2	6	202	2.80
26	.114	1.2	6	172	2.70
27	.114	1.2	6	147	2.60
28	.114	1.2	6	121	2.40
29	.114	1.2	6	110	2.20
30	.114	1.2	6	334	8.30
31	.114	1.2	6	312	5.80
32	.114	1.2	6	291	7.50
33	.114	1.2	6	266	5.50
34	.114	1.2	6	227	5.60
35	.114	1.2	6	199	5.00
36	.114	1.2	6	160	3.70
37	.114	1.2	6	134	3.50
38	.114	1.2	6	99	3.10
39	.114	1.2	6	334	6.50
40	.114	1.2	6	300	6.30
41	.114	1.2	6	276	6.00
42	.114	1.2	6	251	6.00
43	.114	1.2	6	212	6.40
44	.114	1.2	6	183	5.00
45	.114	1.2	6	158	4.50
46	.114	1.2	6	127	3.20
47	.114	1.2	6	334	7.50
48	.114	1.2	6	308	6.00
49	.114	1.2	6	274	4.00
50	.114	1.2	6	239	3.80
51	.114	1.2	6	212	3.80

52	.114	1.2	6	192	3.70
53	.114	1.2	6	164	3.70
54	.114	1.2	6	139	3.60
55	.114	1.2	6	118	3.60
56	.114	1.2	6	91	3.50
57	.114	1.2	6	184	3.70
58	.114	1.2	6	157	3.60
59	.114	1.2	6	134	3.40
60	.066	2.5	6	134	7.10
61	.104	2.5	6	131	7.10
62	.132	2.5	6	128	5.70
63	.157	2.5	6	124	6.10
64	.193	2.5	6	119	11.40
65	.218	2.5	6	114	14.50
66	.250	2.5	6	137	16.20
67	.313	2.5	6	129	16.50
68	.313	2.5	6	120	16.00
69	.066	3	6	134	4.70
70	.104	3	6	131	5.20
71	.132	3	6	128	5.80
72	.157	3	6	125	5.80
73	.193	3	6	119	4.80
74	.218	3	6	112	5.70
75	.250	3	6	132	13.00
76	.313	3	6	117	12.80
77	.066	3.2	6	134	7.00
78	.104	3.2	6	131	6.40
79	.132	3.2	6	127	6.30
80	.157	3.2	6	122	10.90
81	.193	3.2	6	116	13.90

82	.218	3.2	6	110	13.90
83	.250	3.2	6	130	10.70
84	.313	3.2	6	116	15.00
85	.066	2.5	6	134	3.80
86	.104	2.5	6	130	4.70
87	.132	2.5	6	126	3.80
88	.157	2.5	6	122	4.40
89	.193	2.5	6	117	4.40
90	.218	2.5	6	111	6.80
91	.250	2.5	6	132	16.90
92	.313	2.5	6	119	16.90
93	.066	2.8	6	132	7.40
94	.104	2.8	6	128	7.40
95	.132	2.8	6	122	4.90
96	.157	2.8	6	115	5.70
97	.193	2.8	6	108	6.00
98	.218	2.8	6	100	6.00
99	.250	2.8	6	118	8.00
100	.313	2.8	6	108	8.00
101	.066	3	6	123	4.50
102	.104	3	6	119	4.50
103	.132	3	6	115	4.80
104	.157	3	6	111	4.80
105	.193	3	6	106	5.00
106	.218	3	6	102	13.70
107	.250	3	6	121	13.50
108	.313	3	6	112	14.00
109	.193	2.4	18	194	5.00
110	.193	2.4	18	165	4.70
111	.193	2.4	18	127	10.40

112	.197	2.4	18	99	6.30
113	.197	2.4	18	84	5.50
114	.197	2.8	18	210	7.00
115	.197	2.8	18	186	5.70
116	.197	2.8	18	162	8.50
117	.197	2.8	18	134	8.00
118	.197	2.8	18	110	9.00
119	.197	2.8	18	84	5.00
120	.197	3.3	18	156	7.00
121	.197	3.3	18	140	6.00
122	.197	3.3	18	120	5.00
123	.197	3.3	18	94	5.02
124	.197	3.3	18	84	4.50
125	.25	1.1	18	335	4.30
126	.25	1.1	18	305	6.30
127	.25	1.1	18	266	6.30
128	.25	1.1	18	224	6.20
129	.25	1.1	18	217	6.20
130	.25	1.1	18	187	6.00
131	.25	1.1	18	146	6.00
132	.25	1.1	18	118	4.30
133	.25	1.2	18	328	7.60
134	.25	1.2	18	306	7.20
135	.25	1.2	18	283	6.30
136	.25	1.2	18	257	5.20
137	.25	1.2	18	230	4.80
138	.25	1.2	18	198	4.20
139	.25	1.2	18	169	5.00
140	.25	1.2	18	128	4.80
141	.25	1.2	18	105	4.50

142	.25	1.15	18	335	10.10
143	.25	1.15	18	302	9.20
144	.25	1.15	18	260	9.00
145	.25	1.15	18	218	6.60
146	.25	1.15	18	179	6.60
147	.25	1.15	18	141	6.50
148	.25	1.15	18	113	5.00
149	.25	1.2	12	335	9.50
150	.25	1.2	12	313	9.50
151	.25	1.2	12	286	6.60
152	.25	1.2	12	264	6.50
153	.25	1.2	12	226	6.00
154	.25	1.2	12	202	6.00
155	.25	1.2	12	185	6.00
156	.25	1.2	12	162	5.70
157	.25	1.2	12	146	5.60
158	.25	1.2	12	131	5.50
159	.25	1.2	12	107	4.80
160	.25	1.2	12	335	7.90
161	.25	1.2	12	312	5.50
162	.25	1.2	12	289	5.50
163	.25	1.2	12	262	5.40
164	.25	1.2	12	240	5.30
165	.25	1.2	12	216	5.20
166	.25	1.2	12	200	5.10
167	.25	1.2	12	171	4.50
168	.25	1.2	12	145	4.30
169	.25	1.2	12	129	4.10
170	.25	1.2	12	105	4.00
171	.25	1.5	12	330	7.50

172	.25	1.5	12	309	7.50
173	.25	1.5	12	280	7.90
174	.25	1.5	12	257	7.90
175	.25	1.5	12	235	7.90
176	.25	1.5	12	208	7.90
177	.25	1.5	12	180	7.40
178	.25	1.5	12	156	5.70
179	.25	1.5	12	132	5.60
180	.25	1.5	12	110	5.00
181	.193	3	12	335	14.10
182	.193	3	12	307	11.10
183	.193	3	12	290	11.00
184	.193	3	12	274	11.30
185	.193	3	12	259	10.50
186	.193	3	12	245	10.40
187	.193	3	12	233	10.30
188	.193	3	12	213	10.20
189	.193	3	12	194	10.20
190	.193	3	12	181	10.00
191	.193	3	12	166	9.90
192	.193	3	12	147	9.90
193	.193	3	12	132	9.00
194	.193	3	12	120	8.10
195	.193	3	12	111	5.80
196	.193	3	12	102	5.80
197	.193	3	12	92	5.30
198	.193	2.5	12	335	10.90
199	.193	2.5	12	324	9.90
200	.193	2.5	12	315	9.60
201	.193	2.5	12	291	9.40
202	.193	2.5	12	277	8.70
203	.193	2.5	12	263	8.70
204	.193	2.5	12	250	8.00
205	.193	2.5	12	241	8.10
206	.193	2.5	12	223	7.40
207	.193	2.5	12	202	6.30
208	.193	2.5	12	187	6.00
209	.193	2.5	12	178	6.00
210	.193	2.5	12	164	5.80
211	.193	2.5	12	153	5.50
212	.193	2.5	12	140	4.90
213	.193	2.5	12	124	4.80
214	.193	2.5	12	113	4.80
215	.193	2.5	12	103	4.50
216	.165	2	6	317	4.90
217	.165	2	6	312	4.90
218	.165	2	6	296	7.20
219	.165	2	6	278	6.00
220	.165	2	6	260	6.30
221	.165	2	6	238	5.40
222	.165	2	6	218	6.40
223	.165	2	6	200	6.60
224	.165	2	6	187	4.30
225	.165	2	6	178	5.30
226	.165	2	6	163	4.90
227	.165	2	6	146	5.60
228	.165	2	6	106	5.70
229	.065	2	6	134	4.90
230	.076	2	6	132	4.90

231	.091	2	6	130	4.10
232	.114	2	6	128	4.20
233	.140	2	6	127	3.60
234	.158	2	6	123	3.40
235	.182	2	6	121	4.60
236	.202	2	6	133	3.20
237	.227	2	6	127	2.70
238	.260	2	6	119	2.30
239	.303	2	6	118	1.90
240	.182	2	6	167	2.70
241	.182	1.75	6	154	2.60
242	.182	1.5	6	132	2.50
243	.182	1.25	6	167	1.80
244	.182	1	6	143	1.80
245	.182	2.25	6	129	3.80
246	.182	2.5	6	131	4.80
247	.158	3.5	3	334	6.40
248	.158	3.5	3	321	6.39
249	.158	3.5	3	303	6.36
250	.158	3.5	3	291	6.33
251	.158	3.5	3	280	6.33
252	.158	3.5	3	264	6.20
253	.158	3.5	3	255	6.20
254	.158	3.5	3	245	6.20
255	.158	3.5	3	233	6.16
256	.158	3.5	3	223	6.13
257	.158	3.5	3	210	6.13
258	.158	3.5	3	205	5.95
259	.158	3.5	3	186	5.89
260	.158	3.5	3	174	5.89

261	.158	3.5	3	160	5.88
262	.158	3.5	3	148	5.81
263	.158	3.5	3	136	5.84
264	.158	3.5	3	125	5.87
265	.158	3.5	3	114	5.63
266	.158	3.5	3	106	5.73
267	.158	3.5	3	96	5.76
268	.158	3.5	3	88	5.79
269	.158	3.5	3	79	5.75
270	.158	3.5	3	71	5.73
271	.140	4	3	334	5.71
272	.140	4	3	328	5.71
273	.140	4	3	321	5.65
274	.140	4	3	316	5.65
275	.140	4	3	309	5.57
276	.140	4	3	302	5.57
277	.140	4	3	296	5.54
278	.140	4	3	285	5.09
279	.140	4	3	283	4.30
280	.140	4	3	274	4.30
281	.140	4	3	265	3.66
282	.140	4	3	257	3.18
283	.140	4	3	249	2.55
284	.140	4	3	244	2.55
285	.140	4	3	237	2.47
286	.140	4	3	230	2.39
287	.140	4	3	223	2.15
288	.140	4	3	212	2.15
289	.140	4	3	206	2.10
290	.140	4	3	199	2.09

291	.140	4	3	192	1.86
292	.140	4	3	182	1.85
293	.140	4	3	174	1.75
294	.140	4	3	167	1.75
295	.140	4	3	159	1.67
296	.140	4	3	151	1.27
297	.140	4	3	144	1.91
298	.140	4	3	136	1.73
299	.140	4	3	128	1.62
300	.140	4	3	119	1.56
301	.140	4	3	114	1.56
302	.140	4	3	106	1.54
303	.140	4	3	98	1.54
304	.140	4	3	88	1.31
305	.140	4	3	76	1.35
306	.140	4	3	334	4.77
307	.140	2.5	3	318	4.46
308	.140	2.5	3	313	4.46
309	.140	2.5	3	304	3.50
310	.070	2.5	3	296	3.82
311	.070	2.5	3	290	3.50
312	.070	2.5	3	281	3.34
313	.070	2.5	3	272	3.34
314	.070	2.5	3	263	2.71
315	.070	2.5	3	252	2.63
316	.070	2.5	3	242	2.55
317	.070	2.5	3	232	2.55
318	.070	2.5	3	226	2.47
319	.070	2.5	3	217	2.55
320	.070	2.5	3	211	2.55

321	.140	2.5	3	202	2.42
322	.140	2.5	3	190	2.39
323	.140	2.5	3	182	2.23
324	.140	2.5	3	173	1.91
325	.140	2.5	3	164	1.27
326	.140	2.5	3	156	2.51
327	.140	2.5	3	132	2.47
328	.140	2.5	3	116	2.39
329	.140	2.5	3	98	2.23
330	.140	2.5	3	84	1.45
331	.070	3	3	334	5.73
332	.140	3	3	323	5.41
333	.140	3	3	310	5.09
334	.140	3	3	300	4.93
335	.140	3	3	289	4.46
336	.140	1.5	9	334	7.96
337	.140	1.5	9	327	7.64
338	.140	1.5	9	320	7.64
339	.140	1.5	9	305	4.77
340	.140	1.5	9	292	5.73
341	.140	1.5	9	279	5.57
342	.140	1.5	9	267	5.57
343	.140	1.5	9	259	5.09
344	.140	1.5	9	245	5.09
345	.140	1.5	9	232	4.93
346	.140	1.5	9	220	4.46
347	.140	1.5	9	208	3.50
348	.140	1.5	9	194	3.50
349	.140	1.5	9	187	3.18
350	.140	1.5	9	167	3.18

351	.140	1.5	9	147	3.18
352	.140	1.5	9	135	2.71
353	.140	1.5	9	123	2.39
354	.140	1.5	9	113	2.39
355	.140	1.5	9	92	1.43
356	.182	1.5	9	334	7.64
357	.182	1.5	9	325	7.16
358	.182	1.5	9	308	6.68
359	.182	1.5	9	298	4.62
360	.182	1.5	9	282	4.62
361	.182	1.5	9	267	4.70
362	.182	1.5	9	252	4.77
363	.182	1.5	9	238	4.77
364	.182	1.5	9	221	4.46
365	.182	1.5	9	206	3.98
366	.182	1.5	9	185	3.50
367	.182	1.5	9	166	3.02
368	.182	1.5	9	152	2.39
369	.182	1.5	9	128	2.39
370	.182	1.5	9	106	1.59
371	.182	1.5	9	92	1.43
372	.140	1.2	15	334	11.46
373	.140	1.2	15	322	11.44
374	.140	1.2	15	319	11.30
375	.140	1.2	15	310	10.50
376	.140	1.2	15	301	10.34
377	.140	1.2	15	289	10.15
378	.140	1.2	15	280	10.15
379	.140	1.2	15	268	10.06
380	.140	1.2	15	256	9.87

381	.140	1.2	15	246	9.85
382	.140	1.2	15	234	9.85
383	.140	1.2	15	224	9.71
384	.140	1.2	15	215	9.71
385	.140	1.2	15	205	9.55
386	.140	1.2	15	195	9.53
387	.140	1.2	15	183	9.47
388	.140	1.2	15	173	8.28
389	.140	1.2	15	161	8.28
390	.140	1.2	15	151	7.96
391	.140	1.2	15	145	7.48
392	.140	1.2	15	132	6.53
393	.140	1.2	15	124	6.05
394	.140	1.2	15	114	5.09
395	.140	1.2	15	106	3.98
396	.140	1.2	15	100	3.18
397	.140	1.2	15	92	1.91
398	.158	3	15	334	10.82
399	.158	3	15	327	10.65
400	.158	3	15	325	10.34
401	.158	3	15	318	10.31
402	.158	3	15	309	10.35
403	.158	3	15	302	10.30
404	.158	3	15	298	10.19
405	.158	3	15	294	10.17
406	.158	3	15	290	10.15
407	.158	3	15	286	10.03
408	.158	3	15	279	9.98
409	.158	3	15	262	9.71
410	.158	3	15	254	9.71

411	.158	3	15	245	9.63
412	.158	3	15	229	9.55
413	.158	3	15	225	9.55
414	.158	3	15	215	9.60
415	.158	3	15	204	9.23
416	.158	3	15	192	9.07
417	.158	3	15	180	7.16
418	.158	3	15	170	6.37
419	.158	3	15	155	5.09
420	.158	3	15	144	5.09
421	.158	3	15	132	4.46
422	.158	3	15	121	3.50
423	.158	3	15	110	3.18
424	.158	3	15	101	2.23
425	.158	3	15	94	1.90
426	.182	3	15	279	9.07
427	.182	3	15	269	8.28
428	.182	3	15	259	7.80
429	.182	3	15	239	7.75
430	.182	3	15	230	7.64
431	.182	3	15	217	7.80
432	.182	3	15	198	6.92
433	.182	3	15	185	6.84
434	.182	3	15	173	6.84
435	.182	3	15	162	7.16
436	.182	3	15	149	7.16
437	.182	3	15	141	7.00
438	.182	3	15	126	6.36
439	.182	3	15	118	5.89
440	.182	3	15	106	3.18
441	.182	3	15	95	3.18
442	.182	3	15	83	2.55
443	.182	3	15	75	1.91

ANEXO 2

CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADAS E VALORES MEDIDOS DE r_c PARA O AÇO
ABNT 5140 (DIN 41Cr4)

TESTE Nº	f [mm/rot]	ap [mm]	γ [Graus]	Vc [m/min]	r_c [mm]
1	.114	1.5	6	264	7.90
2	.114	1.5	6	259	6.00
3	.114	1.5	6	253	5.80
4	.114	1.5	6	231	4.00
5	.114	1.5	6	213	3.90
6	.114	1.5	6	191	4.00
7	.114	1.5	6	165	4.00
8	.114	1.5	6	151	4.90
9	.114	1.5	6	135	3.40
10	.114	1.5	6	117	3.40
11	.114	1.5	6	104	3.00
12	.114	1.5	6	88	3.00
13	.114	1.5	6	264	5.40
14	.114	1.5	6	236	5.50
15	.114	1.5	6	209	5.30
16	.114	1.5	6	185	3.50
17	.114	1.5	6	163	3.50
18	.114	1.5	6	140	3.00
19	.114	1.5	6	113	2.90
20	.114	1.5	6	95	2.70
21	.114	1.5	6	264	5.00
22	.114	1.5	6	239	4.90
23	.114	1.5	6	217	4.50
24	.114	1.5	6	196	3.70
25	.114	1.5	6	168	3.40
26	.114	1.5	6	136	3.20
27	.114	1.5	6	117	3.00
28	.114	1.5	6	93	3.00
29	.114	1.5	6	264	5.30
30	.114	1.5	6	238	5.00
31	.114	1.5	6	219	4.80
32	.114	1.5	6	193	4.80
33	.114	1.5	6	164	4.10
34	.114	1.5	6	135	4.00
35	.114	1.5	6	110	4.00
36	.114	1.5	6	83	4.00
37	.066	2	6	170	6.00
38	.104	2	6	164	5.80
39	.132	2	6	156	6.50
40	.132	2	6	146	5.20
41	.157	2	6	135	7.00
42	.193	2	6	97	5.50
43	.218	2	6	89	5.40
44	.250	2	6	80	4.70
45	.313	2	6	66	3.80
46	.358	2	6	43	3.80
47	.418	2	6	34	3.50
48	.066	2	6	170	6.00
49	.104	2	6	161	6.50
50	.132	2	6	152	4.60
51	.157	2	6	136	3.90
52	.193	2	6	97	3.80
53	.218	2	6	87	3.80

54	.250	2	6	74	3.80
55	.313	2	6	62	3.70
56	.358	2	6	41	3.00
57	.066	2	6	264	6.00
58	.104	2	6	230	6.00
59	.132	2	6	212	6.00
60	.157	2	6	194	5.00
61	.193	2	6	90	4.50
62	.218	2	6	82	3.50
63	.250	2	6	72	3.50
64	.313	2	6	63	3.30
65	.358	2	6	41	3.00
66	.418	2	6	34	3.00
67	.066	2	6	265	8.00
68	.104	2	6	253	8.00
69	.132	2	6	239	7.00
70	.157	2	6	224	6.00
71	.193	2	6	103	5.00
72	.218	2	6	98	5.00
73	.25	2	6	93	3.80
74	.313	2	6	87	2.80
75	.358	2	6	64	1.90
76	.418	2	6	51	1.70
77	.418	2	6	39	1.50
78	.157	2.5	18	264	8.00
79	.157	2.5	18	240	10.50
80	.157	2.5	18	211	8.80
81	.157	2.5	18	185	5.80
82	.157	2.5	18	161	5.70
83	.157	2.5	18	144	4.80

84	.157	2.5	18	131	4.80
85	.157	2.5	18	116	3.50
86	.157	2.5	18	99	3.00
87	.157	2.5	18	170	9.00
88	.157	2.5	18	164	8.50
89	.157	2.5	18	160	8.00
90	.157	2.5	18	144	5.40
91	.157	2.5	18	136	5.30
92	.157	2.5	18	124	5.50
93	.157	2.5	18	116	4.90
94	.157	2.5	18	108	4.70
95	.157	2.5	18	100	4.50
96	.157	2.5	18	91	3.70
97	.157	2.5	18	81	3.50
98	.157	2.5	18	72	3.30
99	.157	2.5	18	61	3.20
100	.25	2.5	18	134	6.50
101	.25	2.5	18	124	6.50
102	.25	2.5	18	113	6.60
103	.25	2.5	18	103	6.30
104	.25	2.5	18	96	5.40
105	.25	2.5	18	89	4.80
106	.25	2.5	18	82	4.80
107	.25	2.5	18	75	4.70
108	.25	2.5	18	64	4.00
109	.25	2.5	18	54	3.40
110	.25	2.5	18	46	3.00
111	.313	2.5	18	134	6.90
112	.313	2.5	18	125	6.00
113	.313	2.5	18	114	5.00

8343/95

114	.313	2.5	18	100	4.00
115	.313	2.5	18	89	4.00
116	.313	2.5	18	79	3.80
117	.313	2.5	18	68	2.80
118	.313	2.5	18	57	2.80
119	.313	2.5	18	47	2.20
120	.157	3	12	238	5.00
121	.157	3	12	222	4.90
122	.157	3	12	202	4.50
123	.157	3	12	179	3.50
124	.157	3	12	160	2.70
125	.157	3	12	135	2.30
126	.157	3	12	111	2.00
127	.157	3	12	87	1.90
128	.157	3	12	170	4.80
129	.157	3	12	161	4.80
130	.157	3	12	153	3.90
131	.157	3	12	143	4.00
132	.157	3	12	134	3.50
133	.157	3	12	126	3.60
134	.157	3	12	111	3.40
135	.157	3	12	99	3.20
136	.157	3	12	90	2.30
137	.157	3	12	79	2.00
138	.157	3	12	65	1.60
139	.157	3	12	55	1.40
140	.25	3	12	134	4.90
141	.25	3	12	123	4.50
142	.25	3	12	107	4.30
143	.25	3	12	94	4.30

144	.25	3	12	77	3.70
145	.25	3	12	73	3.30
146	.25	3	12	63	2.80
147	.25	3	12	55	2.60
148	.25	3	12	45	2.30
149	.313	3	12	134	4.20
150	.313	3	12	123	3.80
151	.313	3	12	112	2.90
152	.313	3	12	96	2.90
153	.313	3	12	84	2.10
154	.313	3	12	72	1.80
155	.313	3	12	63	1.80
156	.313	3	12	53	1.60
157	.313	3	12	45	1.60
158	.140	2.5	3	264	6.75
159	.140	2.5	3	251	6.05
160	.140	2.5	3	242	4.77
161	.140	2.5	3	231	3.50
162	.140	2.5	3	222	3.09
163	.140	2.5	3	218	3.02
164	.140	2.5	3	209	2.86
165	.140	2.5	3	202	2.79
166	.140	2.5	3	192	3.18
167	.140	2.5	3	182	3.00
168	.140	2.5	3	171	2.71
169	.140	2.5	3	158	2.69
170	.140	2.5	3	149	2.79
171	.140	2.5	3	138	2.39

172	.140	2.5	3	123	2.36
173	.140	2.5	3	114	2.16
174	.140	2.5	3	102	2.16
175	.140	2.5	3	94	2.16
176	.140	2.5	3	81	2.04
177	.140	2.5	3	73	1.59
178	.182	3	3	264	6.37
179	.182	3	3	256	6.20
180	.182	3	3	250	4.46
181	.182	3	3	243	3.18
182	.182	3	3	232	3.14
183	.182	3	3	221	3.18
184	.182	3	3	208	3.18
185	.182	3	3	197	3.02
186	.182	3	3	193	2.86
187	.182	3	3	177	2.79
188	.182	3	3	167	2.71
189	.182	3	3	150	2.67
190	.182	3	3	139	2.66
191	.182	3	3	127	2.71
192	.182	3	3	112	2.06
193	.182	3	3	99	2.02
194	.182	3	3	86	1.91
195	.182	3	3	78	1.88
196	.182	3	3	72	1.27
197	.140	2.5	9	264	7.32
198	.140	2.5	9	244	7.00
199	.140	2.5	9	238	6.37
200	.140	2.5	9	223	5.89
201	.140	2.5	9	212	4.93

202	.140	2.5	9	207	5.09
203	.140	2.5	9	200	5.09
204	.140	2.5	9	190	5.01
205	.140	2.5	9	184	4.93
206	.140	2.5	9	164	4.77
207	.140	2.5	9	151	4.46
208	.140	2.5	9	139	4.14
209	.140	2.5	9	128	4.14
210	.140	2.5	9	114	3.18
211	.140	2.5	9	102	2.71
212	.140	2.5	9	88	2.07
213	.140	2.5	9	79	1.27
214	.182	3	9	264	8.44
215	.182	3	9	255	7.64
216	.182	3	9	246	5.41
217	.182	3	9	233	5.25
218	.182	3	9	220	4.77
219	.182	3	9	203	3.98
220	.182	3	9	190	4.46
221	.182	3	9	174	4.46
222	.182	3	9	152	4.38
223	.182	3	9	143	4.30
224	.182	3	9	135	4.14
225	.182	3	9	128	4.17
226	.182	3	9	120	3.82
227	.182	3	9	113	3.29
228	.182	3	9	107	3.17
229	.182	3	9	98	3.02
230	.182	3	9	92	2.83
231	.182	3	9	86	2.23

232	.182	3	9	81	2.05
233	.182	3	9	77	1.91
234	.158	2.5	15	223	7.16
235	.158	2.5	15	212	6.84
236	.158	2.5	15	202	6.37
237	.158	2.5	15	189	5.73
238	.158	2.5	15	179	5.09
239	.158	2.5	15	168	3.98
240	.158	2.5	15	156	3.50
241	.158	2.5	15	141	3.37
242	.158	2.5	15	122	2.91
243	.158	2.5	15	106	2.31
244	.158	2.5	15	88	1.91
245	.158	2.5	15	76	1.59
246	.158	3	15	264	7.96
247	.158	3	15	252	6.68
248	.158	3	15	242	6.37
249	.158	3	15	231	7.16
250	.158	3	15	217	5.25
251	.158	3	15	204	4.62
252	.158	3	15	190	1.18
253	.158	3	15	176	3.02
254	.158	3	15	157	2.71
255	.158	3	15	150	2.55
256	.158	3	15	144	2.50
257	.158	3	15	132	2.39
258	.158	3	15	127	2.39
259	.158	3	15	117	2.37
260	.158	3	15	107	1.91
261	.158	3	15	98	1.59
262	.158	3	15	86	1.59
263	.182	2.5	15	264	10.34
264	.182	2.5	15	253	9.87
265	.182	2.5	15	246	9.23
266	.182	2.5	15	234	7.48
267	.182	2.5	15	226	7.16
268	.182	2.5	15	215	6.37
269	.182	2.5	15	207	6.21
270	.182	2.5	15	202	5.89
271	.182	2.5	15	190	5.57
272	.182	2.5	15	183	5.09
273	.182	2.5	15	174	4.46
274	.182	2.5	15	166	3.18
275	.182	2.5	15	159	3.18
276	.182	2.5	15	150	3.02
277	.182	2.5	15	143	3.02
278	.182	2.5	15	135	3.02
279	.182	2.5	15	129	2.71
280	.182	2.5	15	113	2.23
281	.182	2.5	15	106	1.91
282	.182	2.5	15	98	1.59
283	.182	2.5	15	90	1.59
284	.182	2.5	15	82	1.27
285	.182	3	15	264	8.75
286	.182	3	15	255	7.80
287	.182	3	15	244	7.80
288	.182	3	15	234	7.48
289	.182	3	15	229	6.21
290	.182	3	15	222	6.05
291	.182	3	15	216	5.89

292	.182	3	15	201	4.93
293	.182	3	15	206	5.09
294	.182	3	15	194	5.09
295	.182	3	15	187	4.14
296	.182	3	15	180	3.82
297	.182	3	15	171	3.66
298	.182	3	15	164	3.34
299	.182	3	15	160	3.02
300	.182	3	15	150	3.02
301	.182	3	15	141	3.18
302	.182	3	15	131	2.71
303	.182	3	15	124	2.63
304	.182	3	15	117	2.71
305	.182	3	15	107	1.91
306	.182	3	15	101	1.75
307	.182	3	15	94	1.59
308	.182	3	15	85	1.62
309	.182	3	15	80	1.51
310	.182	3	15	74	.95

ANEXO 3

A - SISTEMA DE ANÁLISE DE IMAGENS:

Foi utilizado um sistema de análise de imagens Image-Pro PLUSS, Versão 2.0, da Media Cybernetics, USA, 1992, que é um programa de computador que foi instalado em um micro computador, modelo 486, que possui, recursos, entre outros, para fazer medições, como: distância entre pontos, entre retas, ângulos, áreas, etc., dentro de uma imagem específica fornecida ao sistema, neste caso através de um vídeo cassete. É necessário fornecer ao sistema, dimensões dos componentes da imagem a ser analisada, ou seja fazer a devida calibração. Neste trabalho foi fixado no suporte porta-ferramentas um adesivo com uma reta de 20 mm de comprimento e um quadrado de 7 mm de aresta, conforme Figura A3.1.



Figura A3.1 - Parâmetros fornecidos para a calibração do analisador de imagens.

Faz-se a medição da área e do perímetro, de uma região de interesse, neste caso da curvatura do cavaco e à partir de relações matemáticas calcula-se o raio de curvatura natural do cavaco, r_c .

B - CÂMERA CCD HITACHI KP-110:

Esta câmera filmadora foi utilizada com o objetivo de adquirir as imagens, *in situ*, do Corte Ortogonal, que foram posteriormente processadas e analisadas. A visualização das imagens geradas foram conseguidas através de um monitor Hitachi.

A câmera fornece imagens em preto e branco, com visualização de 60 [quadros/s]. Nela está acoplada uma objetiva (Toyo Optics TV Zoom Lens 12.5 - 75 [mm] F1.8), com uma lente de 75 [mm] de comprimento focal, para a qual há um jogo de três filtros "close-up" (+1, +2, +4), com função de alterar o fator de ampliação da imagem, modificando também o ponto de foco. Entende-se, aqui por ponto de foco a distância entre a lente externa da objetiva e o objeto filmado, neste caso a usinagem. Além disso há um filtro UV, para proteção dos filtros "close-up" e da própria lente da câmera contra raios Ultra-violeta e eventuais danos físicos como, riscos provocados por elementos externos.

A Figura A3.2 nos mostra um diagrama esquemático da filmadora, enumerando seus dispositivos de ajustes.

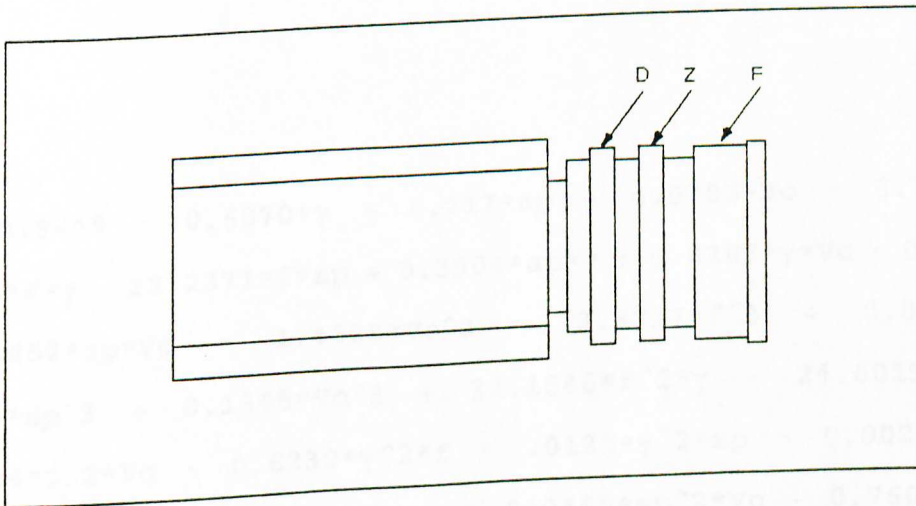


Figura A3.2 - Esquema das regulagens das objetivas (Toyo) da câmera, onde a simbologia representa:

D - Regulagem do diafragma;

Z - Regulagem do "zoom";

F - Regulagem do foco.

ANEXO 4

POLINÔMIO AJUSTADO PARA O AÇO ABNT 1020

$$\begin{aligned}
 r_c = & 0.9419 - 0.6070*\gamma - 0.717*ap + 4.0786*vc - 6.7304*f^2 + \\
 & 0.8246*f*\gamma - 22.2371*f*ap + 0.3906*ap*\gamma + 0.8285*\gamma*vc - 0.0635*ap^2 \\
 & + 0.3852*ap*vc - 1.4625*vc^2 - 3.3721*f^3 + 0.0049*\gamma^3 - \\
 & 0.1036*ap^3 + 0.1345*vc^3 + 33.1546*f^2*\gamma - 24.6019*f^2*ap - \\
 & 24.3524*f^2*vc - 0.6239*\gamma^2*f - .0125*\gamma^2*ap - 0.0025*\gamma^2*vc + \\
 & 8.5134*ap^2*f - 0.0325*ap^2*\gamma - 0.0465*ap^2*vc + 0.7606*vc^2*f - \\
 & 0.0704*vc^2*\gamma - 0.0234*vc^2*ap - 0.2173*f*\gamma*vc + 0.1623*f*ap*vc - \\
 & 0.0029*ap*\gamma*vc.
 \end{aligned}$$

Onde as unidades das variáveis são expressas em: r_c [mm];

f [mm/rot]; ap [mm]; γ [Graus] e vc [m/min].

ANEXO 5

POLINÔMIO AJUSTADO PARA O AÇO ABNT 5140

$$\begin{aligned}
r_c = & 8.1644 + 10.4737*f + 10.2725*ap - .0003*\gamma - 7.0811*Vc + \\
& 5.9551*f^2 + 121599*f*ap - 13.3150*f*\gamma + 6.3682*f*Vc - 5.0105*ap^2 \\
& + .3401*ap*\gamma - .7409*ap*Vc + .0980*\gamma^2 - .1956*\gamma*Vc + 1.3554*Vc^2 \\
& + 5.6611*f^3 - .2589*ap^3 - .0875*Vc^3 + 6.7754*f^2*ap - \\
& 2.4111*f^2*\gamma - 8.5213*f^2*Vc + 9.8099*ap^2*f + .2143*ap^2*\gamma + \\
& .2143*ap^2*Vc + .7596*\gamma^2*f - .0798*\gamma^2*ap - .0013*\gamma^2*Vc - \\
& 1.4754*Vc^2*f + .1300*Vc^2*ap + .0299*Vc^2*\gamma - 3.2810*f*ap*\gamma + \\
& 1.5288*f*ap*Vc + .6265*f*\gamma*Vc - .0487*ap*\gamma*Vc
\end{aligned}$$

Onde as unidades das variáveis são expressas em: r_c [mm]; f [mm/rot]; f [mm]; ap [mm]; γ [Graus] e Vc [m/min].

ANEXO 6

ANÁLISE DE CORRELAÇÃO TOTAL PARA O AÇO AISI 5140

Os Coeficientes de correlação total entre os parâmetros em estudo são:

f	ap	γ	Vc	r_c
- 0.1891	- 0.1446	0.1684	0.6597	1.0000

Os Coeficientes de Correlação fornecem uma medida normalizada e de escala livre de associação entre duas variáveis. Os valores dos coeficientes caem entre -1 e +1. Uma correlação positiva indica que as variáveis variam na mesma direção enquanto que uma correlação negativa indica que as variáveis variam na direção oposta. É um parâmetro estatístico utilizado para indicar o quanto o modelo se adequa aos pontos gerados nos experimentos, e o valor ideal é um (01), ou seja, quanto mais próximo da unidade, melhor se adequa o modelo. Óbviamente r_c tem correlação total com ele mesmo, e o coeficiente é a unidade.

Através destes valores, Vc é o parâmetro que melhor se ajustou ao modelo, seguido do avanço, do ângulo de saída e da profundidade de corte.

Verifica-se que com o aumento da Velocidade de corte e do ângulo de saída, r_c , aumenta, e com aumento do avanço e da profundidade de corte, r_c , diminui.

ANEXO 7

PROGRAMA FEITO PARA TRAÇAR O GRÁFICO, PARA O AÇO ABNT 1020,

DE r_c X ap , MANTENDO-SE OS DEMAIS PARÂMETROS CONSTANTES.

```
%programa wisley AÇO ABNT 1020
```

```
p=[.9419
```

```
0
```

```
-2.6070
```

```
-.7170
```

```
4.0786
```

```
-6.7304
```

```
.8246
```

```
-22.2371
```

```
0
```

```
0
```

```
.3906
```

```
.8285
```

```
-.0635
```

```
.3852
```

```
-1.4625
```

```
-3.3721
```

```
.0049
```

```
-.1036
```

```
.1345
```

```
33.1546
```

```
-24.6019
```

```
-24.3524
```

```
-.6239
```

```
-.0125
```

```
-.0025
```

```
8.5134
```

```
-.0325
```

```
-.0465
```

```
.7606
```

```
-.0704
```

```
-.0234
```

```
0
```

```
-.2173
```

```
.1623
```

```
-.0029];
```

```
%caso 2
```

```
f=.182;
```

```
g=6;
```

```
vc=log(200);
```

```
ap=1.5:.1:4;
```

```
n=length(ap);
```

```
for i=1:n
```

```
    poli(i)=1*p(1)+f*p(2)+g*p(3)+ap(i)*p(4)+vc*p(5)+f^2*p(6)+f*g*p(7)+f*ap(i)*  
p(8)+...
```

```
    f*vc*p(9)+g^2*p(10)+ap(i)*g*p(11)+g*vc*p(12)+ap(i)^2*p(13)+ap(i)*vc*p(14).
```

```
    ..  
    +vc^2*p(15)+f^3*p(16)+g^3*p(17)+ap(i)^3*p(18)+vc^3*p(19)+f^2*g*p(20)...
```

```
    +f^2*ap(i)*p(21)+f^2*vc*p(22)+g^2*f*p(23)+g^2*ap(i)*p(24)+g^2*vc*p(25)...
```

```
    +ap(i)^2*f*p(26)+ap(i)^2*g*p(27)+ap(i)^2*vc*p(28)+vc^2*f*p(29)+vc^2*g*p(30
```

```
)...
```

```
    +vc^2*ap(i)*p(31)+f*ap(i)*g*p(32)+f*g*vc*p(33)+f*ap(i)*vc*p(34)+ap(i)*g*vc
```

```
*p(35);
```

```
end
plot(ap, poli), grid
xlabel(' ap [mm]')
ylabel(' rc [mm]')
title('Vc=200 [m/min] f=0.182 [mm/rot] Gama=6 [Graus]')
```

ANEXO 8

PROGRAMA FEITO PARA TRAÇAR O GRÁFICO, ATRAVÉS DE INTERPOLAÇÃO LINEAR, PARA O AÇO ABNT 5140, DE r_c X γ , MANTENDO-SE OS DEMAIS PARÂMETROS CONSTANTES.

```
% PROGRAMA FEITO PARA INTERPOLAÇÃO LINEAR, PARA O AÇO ABNT 5140,  rc x Gama
f=0.250;
ap=2.5;
vc=log(200);
g=3:3:18;
n=length(g);
for i=1:n
r(i)=-2.3736 + 2.3616*f - 0.3498*ap.....
  + 0.0267*g(i) + 0.7889*vc;
end
plot(g,r),grid
xlabel(' Gama [Graus] ');
ylabel(' rc [mm]');
title('f=0.250 [mm/rot]  ap=2.5 [mm]  Vc=200 [m/min]')
```

ANEXO 9

PROGRAMA FEITO PARA TRAÇAR O GRÁFICO, ATRAVÉS DE INTERPOLAÇÃO DE SEGUNDO GRAU, PARA O AÇO ABNT 5140, DE r_c X γ , MANTENDO-SE OS DEMAIS PARÂMETROS CONSTANTES.

```
% PROGRAMA FEITO PARA INTERPOLAÇÃO DE SEGUNDO GRAU, PARA O AÇO ABNT 5140
% rc X Gama
p=[17.5627
-7.77
-0.3406
-0.1311
-6.6195
-10.3028
2.5407
0.1166
1.3575
-0.4261
-0.0016
0.3081
-0.0006
0.0308
0.6262];
ap=2.5;
vc=log(170);
f=0.250;
g=3:3:18;
n=length(g);
for i=1:n;
r(i)=p(1) + f*p(2) + ap*p(3) + g(i)*p(4) + vc*p(5) + f^2*p(6) + f*ap*p(7)...
+ f*g(i)*p(8) + f*vc*p(9) + ap^2*p(10) + ap*g(i)*p(11) + ap*vc*p(12) + g(i)^
2*p(13)...
+ g(i)*vc*p(14) + vc^2*p(15);
end
plot(g,r),grid
xlabel(' Gama [Graus]');
ylabel(' rc [mm]');
title(' Vc=170 [m/min]  ap=2.5 [mm]  f=0.250 [mm/rot]');
```