



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DO
CAVACO NA USINAGEM DO AÇO ABNT 1045 E DO
FERRO FUNDIDO NODULAR.

MÁRCIO AURÉLIO DA SILVA

Uberlândia, Abril de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DO CAVACO NA
USINAGEM DO AÇO ABNT 1045 E DO FERRO FUNDIDO NODULAR.**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia por:

MÁRCIO AURÉLIO DA SILVA

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

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva (UFU)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva - (UFU)
Prof. Dr. Álisson Rocha Machado - (UFU)
Prof. Dr. Éder Silva Costa - (CEFET-Divinópolis)

Uberlândia, 29 de Abril de 2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586i Silva, Márcio Aurélio da, 1975-
Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço
ABNT 1045 e do ferro fundido nodular / Márcio Aurélio da Silva.- 2008.
72 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Usinagem - Teses. 2. Metais - Corte - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.9

À minha filha Maria Eduarda,
à minha esposa Ana Paula,
aos meus pais, Jesus e Marlene
e a Deus

AGRADECIMENTOS

Ao professor Márcio Bacci da Silva pela orientação, apoio, dedicação, incentivo e exemplo de profissionalismo durante a realização deste trabalho.

Ao professor Álisson Rocha Machado pelo apoio e incentivo.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela infra-estrutura e oportunidade.

Aos colegas de trabalho, Luciano, Fábio, Ítalo e Marcos os quais foram partes essenciais neste trabalho de pesquisa.

Aos demais colegas do Lepu, Ulisses, Éder, Ildeu, Rosemar, e a todos que contribuíram neste trabalho pelas suas importantes discussões e sugestões.

Ao professor Raslan e a técnica Ângela pelo apoio na preparação das micrografias.

Ao técnico Reginaldo, pelo apoio e realização dos ensaios experimentais.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A Capes pelo apoio financeiro.

Ao IFM – Instituto Fábrica do Milênio, pelo apoio às pesquisas do LEPU.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	iv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
 1. INTRODUÇÃO	 1
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 4
2.1 O CORTE ORTOGONAL.....	4
2.2 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO.....	5
2.3. Ângulo de Cisalhamento e Grau de Recalque.....	7
2.4 TIPOS DE CAVACO.....	9
2.4.1 Cavaco contínuo.....	10
2.4.2 Cavaco parcialmente contínuo.....	10
2.4.3 Cavaco descontínuo.....	11
2.4.4 Cavaco segmentado.....	11
2.5 FORMAS DE CAVACO.....	12
2.6 Controle da Forma do Cavaco.....	13
2.7 FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE.....	15
2.7.1 Força de Usinagem no Corte Ortogonal.....	16
2.7.2 Fatores que influenciam a Força de Usinagem.....	18
2.7.3 Pressão Específica de Corte.....	20
2.7.4 Potência de usinagem.....	21
2.8 TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM USINAGEM.....	22
2.9 FORÇA RESIDUAL.....	25
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	30
3.2 MATERIAL USINADO.....	31
3.3 MÁQUINA FERRAMENTA UTILIZADA.....	32
3.4 FERRAMENTAS UTILIZADAS.....	34
3.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	34
3.6 MEDIÇÃO DA MICRODUREZA.....	35

3.7 MEDIÇÃO DAS FORÇAS (DE CORTE E RESIDUAL).....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 Formas dos cavacos.....	36
4.2 Análise metalográfica e resultado das medições de microdureza.....	41
4.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE E DO AVANÇO.....	46
4.3.1 Influência na força de corte.....	56
4.4 FORÇAS DE AVANÇO RESIDUAIS.....	60
5. CONCLUSÕES.....	65
6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

ap.....	profundidade de corte
A.....	área da secção de corte
ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC.....	aresta postiça de corte
b.....	largura de corte
CNC.....	Comando numérico computadorizado
DIN.....	Deustches Institutes fur Normung e. V.
f.....	avanço
Fc.....	força de corte
Ff.....	força de avanço
Fp.....	força passiva
h.....	espessura de corte
h'.....	espessura do cavaco
HV.....	dureza vickers
ISO.....	International Organization for Standardization
R ²	coeficiente de correlação
Rc.....	Grau de recalque
TiN.....	Nitreto de Titânio
Vc.....	velocidade de corte
Vcav.....	velocidade do cavaco
Vz.....	velocidade de cisalhamento

Letras Gregas

α_0		ângulo de folga da ferramenta
χ_r		ângulo de posição
γ_0		ângulo de saída da ferramenta
ϕ		ângulo de cisalhamento do plano primário

RESUMO

Da Silva, M. A., (2008), Investigação Experimental da Formação do Cavaco na Usinagem do aço ABNT 1045 e do Ferro Fundido Nodular. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

A formação do cavaco é influenciada por vários parâmetros de corte que afetam também as forças, tensões, potências e temperaturas geradas durante a usinagem. Apesar de ser estudado a mais de 100 anos, ainda hoje os mecanismos de deformação envolvidos não são totalmente conhecidos. Isto se deve ao fato da formação do cavaco envolver grandes temperaturas e altíssimas taxas de deformação. Este trabalho pretende estudar o processo básico de formação do cavaco bem como a influência dos principais parâmetros de corte, tais como velocidade de corte, avanço, fluído de corte, revestimento da ferramenta e material usinado, além de determinar a força de corte residual para o aço ABNT 1045. A investigação foi baseada na classificação dos cavacos quanto ao seu tipo e forma, valores das espessuras, dos ângulos de cisalhamento, grau de recalque e no monitoramento das forças de corte. Foram feitas micrografias e medição da microdureza dos cavacos para uma análise estrutural mais detalhada.

Os resultados encontrados através dos experimentos mostraram que os parâmetros e condições analisadas realmente influenciam na formação dos cavacos, sendo que o avanço foi mais significativo que a velocidade. O revestimento e o fluído tiveram grande influência tanto na formação do cavaco como nas forças de corte durante a usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular. A força de corte residual para o aço ABNT 1045 variou entre 45 N e 52N.

Palavras chave: Cavaco, Torneamento, Usinagem, Força de corte residual.

Da Silva, M. A., (2008), **Experimental inquiry on chip formation in the machining of ABNT 1045 steel and nodular casting iron**. Master's Degree Dissertation. School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia.

ABSTRACT

The chip formation is influenced by several cut parameters which also affect the forces, tensions, powers and temperatures generated during the machining process. Although they have been studied for more than 100 years, still today, the involved mechanisms of deformation are not totally know, due to the fact that the chip formation involves high temperatures and high levels of deformation. This research aims at studying the basic process of chip formation, as well as the influence of the main cut parameters such as cutting speed, feed rate, cutting fluid, tool coating and machined material, besides determining the force of residual cut for ABNT 1045 steel. The inquiry was based on the classification of the chips concerning their type and form, thicknesses values, shear angles, stresses degree and in the monitoring of the cutting forces. Micrographs and measurement of the chips microhardness were made in order to achieve a detailed structural analysis.

The results found have shown that the parameters and analyzed conditions really influenced the formation of the chips, being the feed rate more significant than the cutting speed. The tool coating and the cutting fluid had a great influence on the chip formation as well as on the cutting forces during the machining of ABNT 1045 steel and nodular casting iron. The residual cutting force for the ABNT 1045 steel varied between 45 N and 52N.

KEY WORDS: Chip, Turning, Machining, Residual Cutting Force.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

No fim do século XIX foram realizados os primeiros estudos para explicar o mecanismo da formação do cavaco, onde se considerava que este fenômeno ocorria pela fratura do material à frente da aresta de corte da ferramenta, no entanto, esta suposição foi prontamente substituída pela teoria do plano de cisalhamento (Ferraresi, 1977). De acordo com Shaw (1984), importantes resultados de pesquisas foram publicados por Piispanen, e são considerados até hoje a primeira análise detalhada do mecanismo de formação do cavaco.

Durante o processo de usinagem é importante conhecer o comportamento de vários fenômenos ou parâmetros, tais como desgaste da ferramenta, força de corte, aresta postiça de corte, calor gerado, efeito de fluido de corte, etc., e para se obter cientificamente uma explicação para o comportamento desses fatores é necessário um estudo minucioso do processo de formação do cavaco (Diniz, 2000). Apesar de ser estudado há mais de 100 anos, ainda hoje os mecanismos de deformação envolvidos não são totalmente conhecidos. Isto se deve ao fato da formação do cavaco envolver grandes temperaturas e altíssimas taxas de deformação, além de altas deformações.

O corte dos metais envolve o cisalhamento concentrado ao longo de uma zona de cisalhamento. Esta zona de cisalhamento é normalmente conhecida como zona de cisalhamento primária. Para simplificar o estudo do processo de usinagem esta zona de cisalhamento é assumida como um plano de cisalhamento. Tem-se então, que o cavaco é formado no plano de cisalhamento primário. Assim, de uma maneira simplificada pode-se estudar a formação do cavaco geometricamente e considerar, por exemplo, um ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção da velocidade de corte. Este ângulo é denominado ângulo de cisalhamento primário e pode ser uma indicação da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco (Machado e Da Silva, 2004).

A formação do cavaco é muito influenciada pelo movimento do mesmo sobre a superfície de saída da ferramenta. Dependendo das condições de corte, propriedades dos materiais da peça e da ferramenta, em parte do contato pode ocorrer aderência (Da Silva, 1998). Esta aderência tem uma importância fundamental

em quase todos os fenômenos envolvidos durante o corte e existem trabalhos importantes sobre este tema (Da Silva, 1998).

O desgaste da ferramenta de corte tem influência na formação do cavaco, já que além de alterar a geometria da ferramenta, altera as condições do contato com o cavaco. Existem alguns trabalhos que mostram a relação entre a formação do cavaco e o comportamento da força de corte, por exemplo, Bickel (1954), do Instituto de Máquinas Operatrizes da E. T. H. de Zurique, filmou a formação do cavaco para altas velocidades de corte, isto é, velocidades correspondentes às condições normais de trabalho da época. Landberg (1948), realizou pesquisas relacionando à medida da frequência de variação da força de corte à formação do cavaco, em certas condições de corte. Borissow (1957) procurou medir a frequência de formação do cavaco através da corrente produzida pelo par térmico ferramenta-peça, onde a variação da força e da velocidade de corte produziam uma variação da corrente elétrica.

E Silva (2007), fez um estudo da formação do cavaco para o aço inoxidável ABNT 304 e obteve correlação entre o desgaste da ferramenta, temperatura do cavaco e coloração do mesmo. Além disso, obteve informações sobre a influência do estado de desgaste da ferramenta no tipo e forma do cavaco obtido.

O cavaco pode ser utilizado para um diagnóstico do processo de usinagem, fornecendo informações, normalmente subjetivas, do nível de desgaste da ferramenta, temperaturas envolvidas entre outras.

Neste estudo, fez-se uma investigação experimental sobre os cavacos formados no torneamento cilíndrico externo do aço-carbono ABNT 1045 e do ferro fundido nodular. O principal objetivo do trabalho foi verificar a influência das condições de corte na formação do cavaco. Foram variadas condições de corte como velocidade de corte, avanço, fluído de corte (e forma de aplicação), revestimento da ferramenta e material da peça. Os cavacos foram caracterizados com relação ao tipo, forma, microdureza e parâmetros geométricos como espessura e grau de recalque.

Neste trabalho também foi feita uma simulação de um corte ortogonal para verificar a variação da força de corte com a espessura indeformada de corte (h). Esta simulação teve o objetivo de obter uma estimativa da força de corte residual (Da Silva, 1998), considerando que pode existir uma espessura mínima de corte abaixo da qual não existe usinagem (Wallbank, 1978).

O capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica. É dividido em sete tópicos onde se apresenta as definições e etapas da formação do cavaco, além da teoria relacionada à forças e potência de corte, tensões e deformações em usinagem e finalmente as definições e considerações relativas às forças residuais.

O capítulo III apresenta os procedimentos experimentais, bem como os materiais e equipamentos utilizados na execução dos experimentos.

No capítulo IV são expostos os resultados obtidos e apresenta-se uma discussão. É dividido em três tópicos.

O capítulo V apresenta as conclusões do trabalho e o capítulo VI as propostas para trabalhos futuros.

Este trabalho é uma pequena contribuição se comparado diante da complexidade desta linha de pesquisa pelo fato da formação do cavaco ser influenciada por vários parâmetros de corte, que afetam também as forças, tensões, potências e temperaturas geradas durante a usinagem. No entanto ainda hoje os mecanismos de deformação envolvidos neste processo não são totalmente conhecidos, principalmente no torneamento cilíndrico externo. Pretende-se então estudar o processo básico de formação do cavaco bem como a influência dos principais parâmetros de corte, tais como: o efeito das condições de corte (velocidade de corte, avanço, revestimento e lubrificação) na formação do cavaco. Analisar a influência na espessura (h') e no ângulo de cisalhamento (ϕ) do cavaco formado. Medir e analisar a influência nas forças e potência na usinagem. Investigar a microestrutura do cavaco formado. Estimar a força de corte residual no corte ortogonal do aço ABNT 1045.

Este trabalho está inserido no projeto Instituto Fábrica do Milênio, através do WP03 - SP13 – Diagnóstico da usinagem pela formação do cavaco.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão abordados neste capítulo assuntos que proporcionarão fundamentos teóricos no que diz respeito as características básicas da formação, do tipo e da forma do cavaco do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular, e sua relação com velocidade de corte, avanço, influência do revestimento da ferramenta, fluido de corte, forças e potências de corte, bem como alguns aspectos relativos as tensões e deformações durante a usinagem destes materiais.

2.1 O CORTE ORTOGONAL

Para iniciar o estudo do processo de usinagem, é necessário considerar algumas simplificações. Assim, a forma mais simplificada de um processo de usinagem é uma cunha cortante se movimentando à uma determinada profundidade num material homogêneo e isotrópico. Esta simplificação é conhecida como corte ortogonal.

No corte ortogonal a aresta cortante é reta, normal à direção de corte e normal também à direção de avanço, de maneira que a formação do cavaco pode ser considerada como um fenômeno bidimensional, o qual se realiza num plano normal à aresta cortante, ou seja, no plano de trabalho [Norma ABNT NBR 6162/1989]. A figura 2.1 apresenta algumas situações práticas que se aproximariam do corte ortogonal.

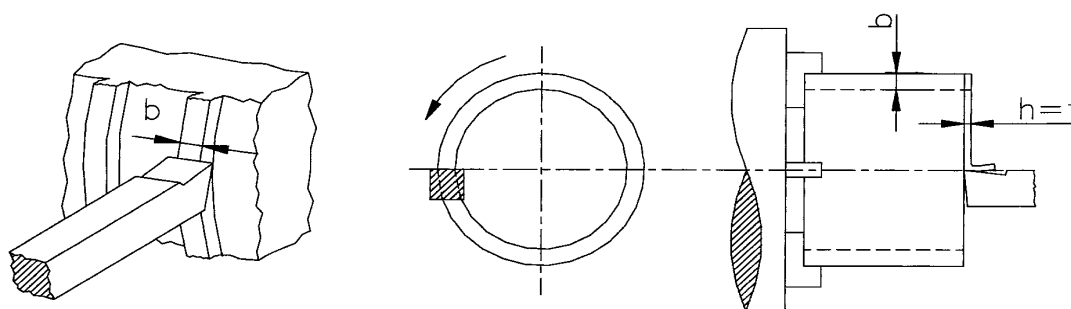


Figura 2.1 - Exemplos de corte ortogonal (Ferraresi,D.,1977) .

Além das simplificações citadas, são feitas as seguintes considerações que permitem um tratamento matemático simplificado do corte ortogonal e que pode ser estendido para outras operações de usinagem.

- o tipo de cavaco formado é contínuo, sem formação de aresta postiça de corte.
- não existe contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça usinada.
- 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 corte b e a largura do cavaco b' são idênticas.

Com todas estas simplificações e considerações o corte ortogonal costuma ser representado como mostra a figura 2.2.

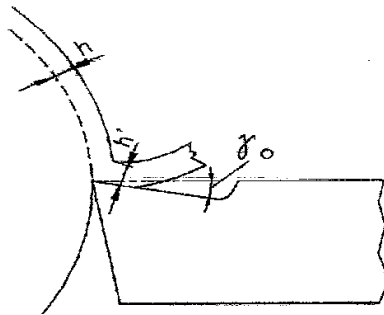


Figura 2.2 - O corte Ortogonal (Machado e Da Silva, 2004) .

Este modelo é usado para estudar o mecanismo de formação do cavaco, os fenômenos envolvidos e as forças atuantes no processo.

2.2 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO

O mecanismo de formação do cavaco pode ser explicado considerando o volume de metal representado pela seção “klmn”, da figura 2.3, se movendo em direção a cunha cortante.

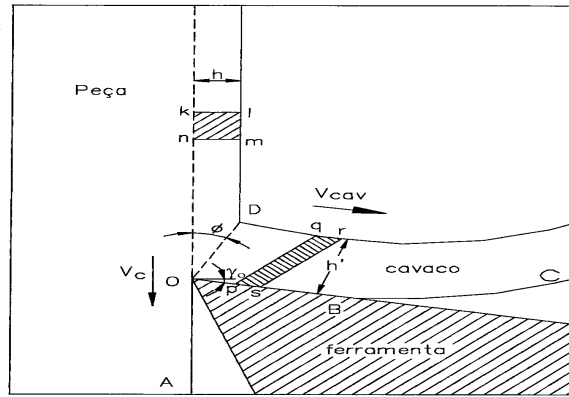


Figura 2.3 - Diagrama da cunha cortante (Trent, 1984).

A ação da ferramenta contra a peça se assemelha com um ensaio de compressão. Considerando o volume de material klmn, quando este atingir a superfície de saída da ferramenta, inicia-se o processo de compressão. Assim o material passa pelo regime elástico, atinge o regime plástico e sofre cisalhamento.

No teste de compressão o cisalhamento ocorre normalmente à 45° . No corte ortogonal este ângulo será diferente, pois as condições são diferentes. De uma forma simplificada, o mecanismo de formação do cavaco pode ser resumido da seguinte forma: a ação da ferramenta recalca o volume “klmn”. Neste ponto o metal começa a sofrer deformações elásticas. Com o prosseguimento do processo o limite de escoamento é vencido e o metal passa a se deformar plasticamente. Deformações plásticas continuam acontecendo até que as tensões não são mais suficientes para manter este regime. Assim fica definido uma zona de cisalhamento primária.

Após o material entrar no regime plástico, o avanço da ferramenta faz com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, ainda dentro da zona de cisalhamento primária, promovendo a ruptura, que se inicia com a abertura de uma trinca no ponto “O” e que pode se estender até o ponto “D”. A extensão de propagação da trinca, que depende principalmente da ductilidade (ou fragilidade) do material da peça, vai determinar o tipo do cavaco, isto é, contínuo ou descontínuo. Após passar pela região de cisalhamento primária, ao volume de material “klmn” só resta movimentar-se por sobre a superfície de saída da ferramenta e sair como um componente, ou lamela do cavaco. Entretanto, ao atravessar a zona de cisalhamento primária ele se deforma plasticamente para um novo formato “pqrs”. O cavaco, na maioria dos casos, ao atravessar a superfície de saída da ferramenta sofre ainda altíssimas deformações plásticas cisalhantes, numa pequena região junto à interface com a ferramenta, desenvolvendo ali altíssimas temperaturas, o que

compromete a resistência das ferramentas; esta região é definida como zona de cisalhamento secundário e pode ser vista na figura 2.4.

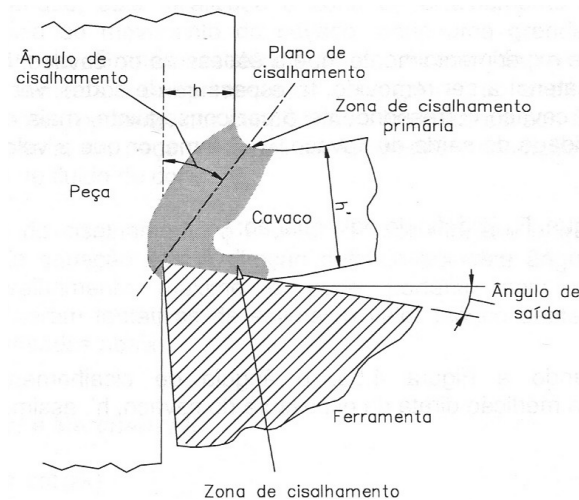


Figura 2.4 - Zonas de cisalhamento primária e secundária (Machado e Da Silva, 2004).

O processo de formação do cavaco pode então ser considerado como um processo cíclico dividido nas seguintes etapas:

- recalque
- deformação plástica
- ruptura
- movimento sobre a superfície de saída da ferramenta.

2.3 ÂNGULO DE CISALHAMENTO E GRAU DE RECALQUE

Durante um ciclo de formação do cavaco, a etapa de deformação plástica acontece por um determinado período, o que define uma zona de cisalhamento primária (figura 2.4). Para simplificar o estudo, esta zona é representada por um plano (linha $\overline{OD}$ da figura 3), denominado plano de cisalhamento primário. O ângulo ϕ é definido como sendo o ângulo formado entre esse plano de cisalhamento primário e o plano de corte (figura 2.3); (Machado e Da Silva, 2004).

Verifica-se experimentalmente, que a espessura do cavaco, h' , é maior que a espessura do material a ser removido, h (espessura de corte), conforme a figura 2.5(a), e o comprimento de cavaco correspondente é por conseguinte, mais curto. Da mesma maneira a velocidade de saída do cavaco, (v_{cav}), é menor que a velocidade de corte, (v_c), conforme a figura 2.5(b); (Machado e Da Silva, 2004).

O ângulo de cisalhamento ϕ pode ser obtido através do ângulo de saída γ e do grau de recalque, definido pela relação:

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (2.1)$$

De acordo com a figura 2.5(a) tem-se aproximadamente:

$$\text{sen } \phi = \frac{h}{l'} \quad (2.2)$$

$$\text{sen } (90 - \phi + \gamma) = \frac{h'}{l'} \quad (2.3)$$

E tirando o valor de ϕ , tem-se:

$$\text{tg } \phi = \frac{\cos \gamma}{R_c - \text{sen } \gamma} \quad (2.4)$$

O valor do grau de recalque, R_c , e portanto do ângulo de cisalhamento, ϕ , é uma boa indicação da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária. Pequenos valores de ϕ (altos valores de R_c) significarão grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário, e vice-versa (Machado e Da Silva, 2004). Podem ser utilizados como uma medida da dificuldade de usinagem de um material. Assim, materiais mais difíceis de usinar teriam altos valores de R_c . No entanto, o grau de recalque também está relacionado com a ductilidade do material da peça.

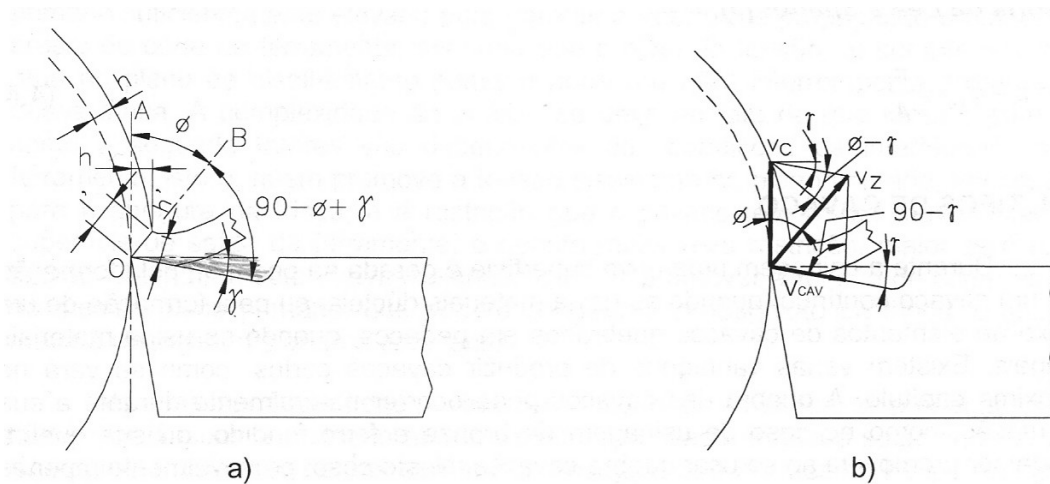


Figura 2.5 - a) Espessura de corte h , espessura do cavaco h' e ângulo de cisalhamento ϕ ; b) Triângulo de velocidades no corte ortogonal. v_c = velocidade de corte; v_{cav} = velocidade de saída do cavaco; v_z = velocidade de cisalhamento (Machado e Da Silva, 2004).

A quantidade de deformações que ocorrem na região primária é raramente menor que 2 para espessuras de cavaco relativamente pequenas (fator de recalque $R_c = 1,5$), podendo alcançar valor igual ou superior a cinco à medida que aumenta o fator de recalque (Lucas, Weingaertner e Bernardini, 2005).

2.4 TIPOS DE CAVACO

Dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem o cavaco formado pode ser classificado em diferentes tipos e formas. Para os materiais dúcteis o cavaco originado é denominado cavaco contínuo e os materiais frágeis originam o cavaco de ruptura, que se apresentam quebrados em pedaços (descontínuos). De acordo com Ferraresi (1977), a classificação mais comum dos cavacos quanto ao seu tipo é aquela citada tanto na literatura alemã como na americana (Schwerd, 1956; Sibel, 1955), e consiste em pelo menos três possibilidades: cavacos contínuos, cavacos de cisalhamento e cavacos de ruptura. Entretanto, Machado e Da Silva (2004), apresentam uma classificação nos seguintes tipos: cavaco contínuo, cavaco parcialmente contínuo ou de cisalhamento, cavaco descontínuo ou de ruptura e cavaco segmentado.

2.4.1 CAVACO CONTÍNUO

São formados na usinagem de materiais dúcteis e apresentam-se constituídos de lamelas justapostas numa disposição contínua, não sendo possível distinguir com nitidez as lamelas formadas. O cavaco contínuo forma-se com altas velocidades de corte (geralmente superiores a 60 m/min) e com ângulos de saída assumindo valores elevados. Cook et al (1954), define a formação do cavaco contínuo como sendo consequência da interrupção da propagação de uma trinca que foi gerada devido a um campo de tensão de tração desenvolvido na ponta da ferramenta, previamente originado pela curvatura imposta pela cunha cortante. Esta interrupção dá-se devido ao material estar sujeito a elevada tensão de compressão depois do campo de tensão de tração, sendo assim a tensão normal no plano de cisalhamento primário é uma importante variável para determinar se o cavaco será contínuo ou descontínuo, e ela é fortemente influenciada pelo ângulo de cisalhamento, ϕ , e pelas condições da interface cavaco-ferramenta (Machado e Da Silva, 2004).

2.4.2 CAVACO PARCIALMENTE CONTÍNUO

É um tipo intermediário entre os cavacos contínuos e descontínuos, também denominado cavaco de cisalhamento (Ferraresi, 1977) e apresentam-se constituídos de lamelas justapostas bem distintas. A trinca se propaga parcialmente no plano de cisalhamento primário, e sugere-se dois fatores importantes relacionados a esta progressão parcial: a energia elástica acumulada na ferramenta pode não ser suficiente para continuar a propagação da trinca fazendo com que o cavaco perca contato com a ferramenta e interrompa a propagação da mesma e a presença de grande tensão de compressão no plano de cisalhamento primário, que elimina a propagação da trinca (Cook et al, 1954).

2.4.3 CAVACO DESCONTÍNUO

Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região de cisalhamento), os quais permanecem separados e é também denominado cavaco de ruptura (Ferraresi, 1977). A superfície de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta é reduzida, assim como a ação do atrito, o ângulo de saída deve assumir valores baixos, nulos ou negativos (Diniz,2000). A trinca, neste caso, se propaga por toda a extensão do plano de cisalhamento primário, promovendo fragmentação do cavaco. A zona de cisalhamento secundária também influencia no processo. Inicialmente, a componente de força tangencial à superfície de saída é menor do que a força necessária para promover o escorregamento do cavaco, havendo então o desenvolvimento de uma zona de material estática, e a separação do cavaco ocorrerá com o aumento da relação força tangencial e força normal. A (figura 2.6), mostra o cavaco descontínuo ou de ruptura.

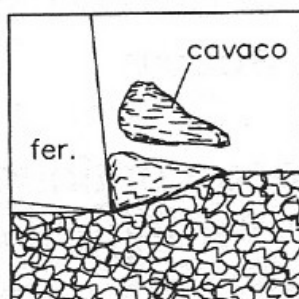


Figura 2.6 - Cavaco descontínuo ou de ruptura (Boothroyd, 1981).

2.4.4 CAVACO SEGMENTADO

Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com pouquíssima, ou quase nenhuma deformação no interior destes segmentos (Machado e Da Silva,2004). Cook (1953) e Shaw et alli (1954), explicaram quantitativamente as características de segmentação dos cavacos. Em seus modelos, a taxa de diminuição na resistência do material, devido ao aumento local da temperatura iguala ou excede a taxa de aumento da resistência devido ao encruamento, no plano de cisalhamento

primário. Isto é peculiar a certos materiais com baixa condutividade térmica. É verificado experimentalmente que alguns materiais a altíssimas velocidades podem sofrer um processo chamado cisalhamento termoplástico catastrófico (Recht, 1964) ou cisalhamento adiabático (Le maire, 1972) e resulta num processo cíclico de produção de cavacos na forma de uma serra dentada conforme (figura 2.7).

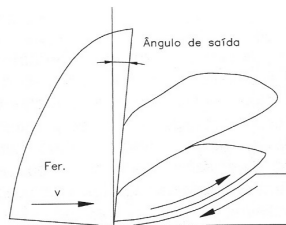


Figura 2.7 - Cavaco segmentado (Komanduri e turkovich, 1981).

2.5 FORMAS DE CAVACO

Os cavacos além de ser classificados através dos quatro tipos, podem ser também classificados quanto a sua forma. Algumas formas de cavaco são indesejadas, pois podem prejudicar a operação de usinagem, prejudicar o acabamento superficial da peça usinada, colocar em risco a integridade dos operadores e podem provocar avarias na ferramenta. Segundo Vieregge (1959) tem-se quatro formas de cavaco (figura 2.8):

- Cavaco em fita.
- Cavaco helicoidal.
- Cavaco espiral.
- Cavaco em lascas ou pedaços.

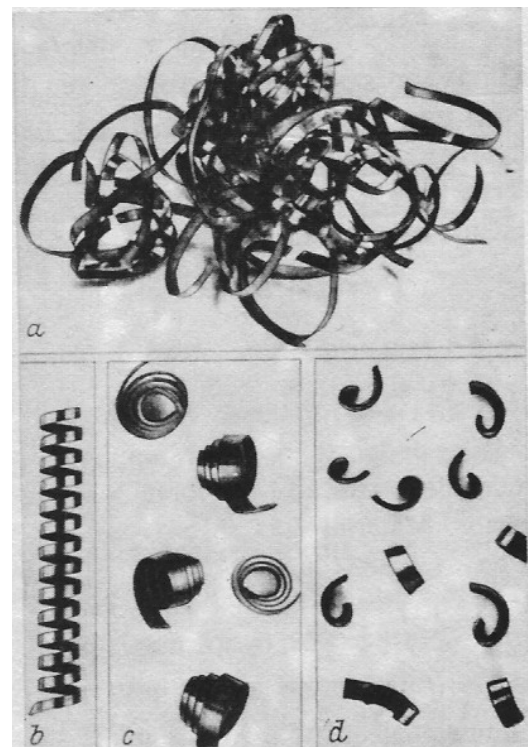


Figura 2.8 - Formas de cavaco: a) Cavaco em fita; b) Cavaco helicoidal; c) Cavaco espiral; d) Cavaco em lascas (Vieregge, 1959).

A norma ISO (1977), faz uma classificação mais detalhada da forma dos cavacos, de acordo com a figura 2.9.

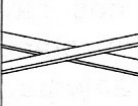
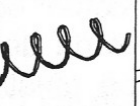
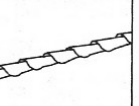
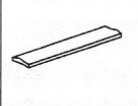
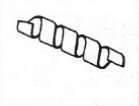
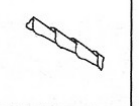
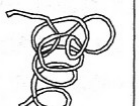
1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Figura 2.9 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais (ISO, 1977).

O cavaco em fita carrega consigo muitos inconvenientes, pois pode provocar acidentes durante o manuseio, ocupa muito espaço e é difícil de ser transportado.

Dentre as formas de cavaco que trazem menos inconvenientes, o cavaco helicoidal é o mais esperado principalmente quando se tratar de alguns processos de usinagem, como por exemplo no fresamento frontal de faceamento, que possui uma taxa de remoção de material muito grande e com isto o cavaco na forma helicoidal tende a saltar fora do bolsão de armazenamento de cavaco entre os dentes da fresa, não tendo risco de entupimento deste espaço (Diniz, 2000).

O cavaco em lascas ou pedaços é uma forma de cavaco preferida somente quando se dispuser de pouco espaço, ou quando o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante sob pressão, como no caso da furação profunda (Diniz, 2000).

2.6 CONTROLE DA FORMA DO CAVACO

Diversos problemas práticos tem relação com a forma do cavaco produzido na usinagem, já que esta tem implicações nas seguintes áreas (Diniz, 2000):

- Segurança do operador: cavacos longos em forma de fita pode, ao atingir o operador, machucá-lo seriamente.

- Possível dano à ferramenta e a peça: cavacos em forma de fita, pode se enrolar à peça, danificando seu acabamento superficial. Além do dano à peça o cavaco em fita pode prejudicar também a ferramenta, pois em algumas operações ele corre o risco de enrolar sobre a peça e tentar penetrar entre a interface peça-ferramenta, podendo causar a quebra da ferramenta, entre outras.
- Manuseio e armazenamento do cavaco: novamente, os cavacos longos em forma de fita é de difícil manuseio e requerem um volume muito grande para ser armazenado, se comparados com cavacos curtos com o mesmo peso.
- Forças de corte, temperatura e vida da ferramenta: ao se procurar deformar mais o cavaco visando se aumentar sua capacidade de quebra, pode-se aumentar bastante os esforços de corte, com conseqüente aumento da temperatura e diminuição da vida da ferramenta.

Pode-se provocar a mudança de forma do cavaco sob diferentes maneiras (Ferraresi, 1977):

- alterando-se as condições de usinagem;
- dando-se uma forma especial à superfície de saída da ferramenta;
- colocando-se elementos adicionais na superfície de saída.

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, isto é através das seguintes alterações (Ferraresi, 1977):

- diminuição do ângulo de saída e de inclinação da ferramenta, ou o emprego de ambos com valores negativos (figura 2.10);
- aumento da espessura h de corte e diminuição da velocidade de corte.

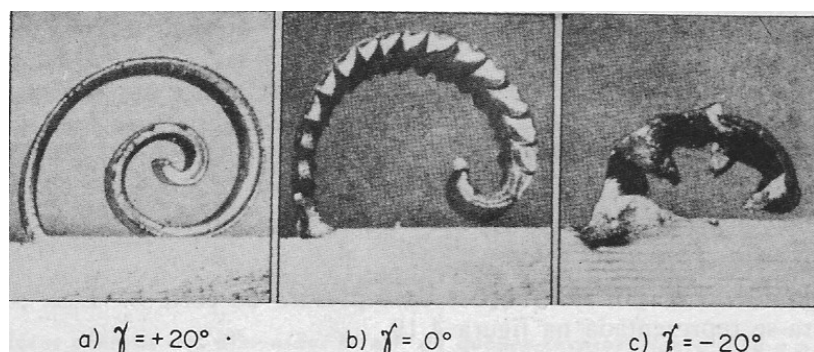


Figura 2.10 - Influência do ângulo de saída γ sobre a forma de cavaco na usinagem de aço, segundo (Vierregge, 1959).

Quanto as condições de corte, em geral, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída, tende a produzir cavacos em fitas (ou contínuos, quanto ao tipo). O avanço é o parâmetro que mais influencia e a profundidade de corte o que menos influencia na forma dos cavacos. A figura 2.11 mostra como as formas dos cavacos são afetadas pelo avanço e pela profundidade (Smith,1989).

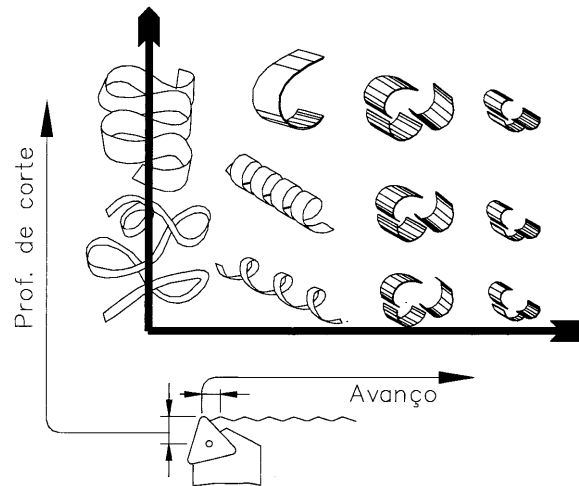


Figura 2.11 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos (Smith,1989).

Na realidade a forma dos cavacos longos é que causam os maiores problemas relativos à segurança e produtividade e, portanto, estas formas de cavacos exigem cuidados especiais (controle).

2.7 FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE

O conhecimento das forças de usinagem que atuam na aresta cortante, bem como o estudo do comportamento de suas componentes são de grande importância, pois elas são necessárias para a determinação da potência de corte, a qual é utilizada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta.

As forças de usinagem exercem influência sobre os mecanismos e processos de desgaste e são responsáveis diretamente pelo colapso das ferramentas por deformação plástica da aresta de corte em determinadas condições. A seguir é apresentado um tratamento matemático simplificado para o corte ortogonal.

2.7.1 FORÇA DE USINAGEM NO CORTE ORTOGONAL

Para melhor entender como as forças de usinagem atuam na cunha cortante, o corte ortogonal deve ser considerado, como mostrado na figura 2.12.

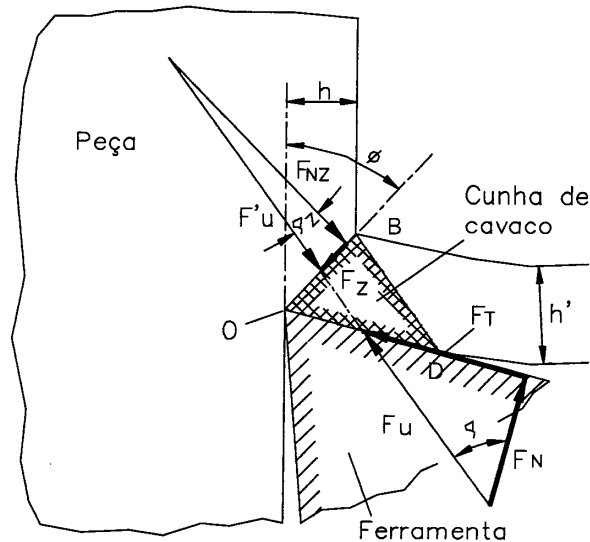


Figura 2.12 - Representação das forças que agem na cunha cortante (Merchant, 1954).

Observando a movimentação da ferramenta em relação à peça, dois grandes grupos de forças distintas são evidenciados:

- Forças provenientes da ação da ferramenta sobre a superfície inferior da cunha do cavaco, cuja resultante é F_u .
- Forças provenientes da ação da peça sobre o plano de cisalhamento primário, cuja resultante é $F_{u'}$.

A força F_u pode ser decomposta em direções conhecidas. Pode ser decomposta por exemplo, nas forças tangente e normal à superfície de saída da ferramenta, F_T e F_N respectivamente. A força F_N é muito importante quando se estuda a interface cavaco-ferramenta e efeito de lubrificação. Quando é possível medir as forças de usinagem é mais conveniente decompor a força F_u na direção da velocidade de corte e na direção de avanço, F_c e F_f respectivamente. Considerando estes dois sistemas de referência e admitindo F_u agindo na ponta da ferramenta, tem-se o sistema conhecido como “círculo de Merchant”, mostrado na figura 2.13.

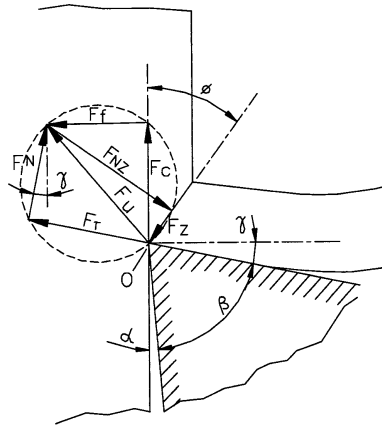


Figura 2.13 - Círculo de Merchant (Ferraresi, 1977).

De acordo com a figura 2.13 a força F_u pode ser decomposta em:

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_f \quad (2.5)$$

Utilizando um dinamômetro, é fácil obter as componentes F_c e F_f . Considerando o corte ortogonal; as demais componentes podem ser obtidas através de simples relações geométricas, conhecidos o ângulo de cisalhamento primário e o ângulo de saída da ferramenta.

No corte tridimensional, o tratamento é idêntico ao corte ortogonal, com a diferença que agora uma terceira componente de F_u está presente, transportando a resultante da força de usinagem do plano para o espaço. A terceira componente é a força passiva F_p (projeção de F_u sobre a perpendicular ao plano de trabalho) e para o torneamento a equação 2.5 fica modificada para:

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (2.6)$$

A figura 2.14 apresenta as componentes da força de usinagem, e todas as componentes para o torneamento cilíndrico externo e fresamento tangencial discordante, segundo a norma DIN 6584 (1963).

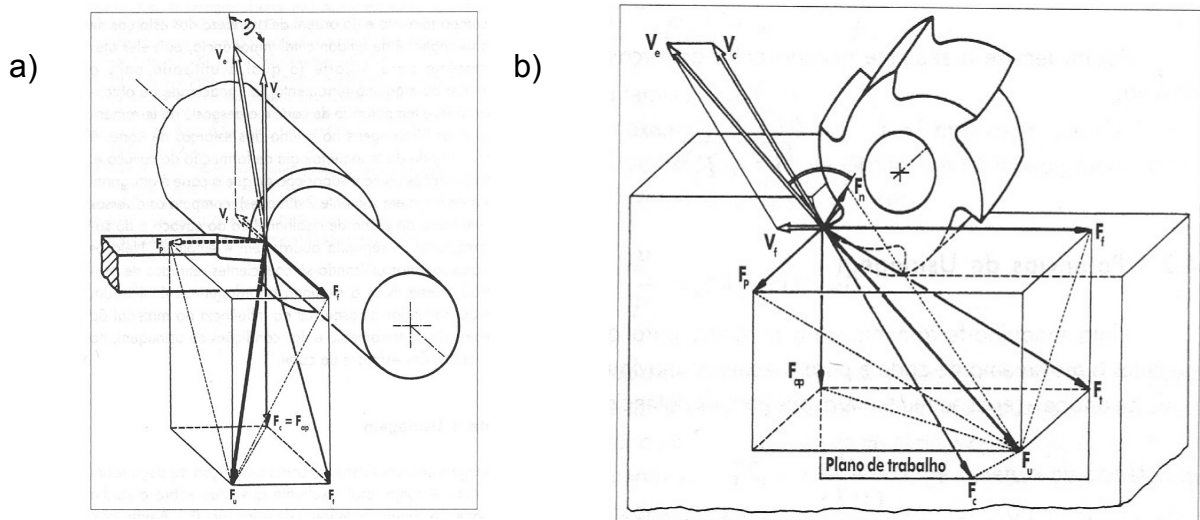


Figura 2.14 - Componentes da força de usinagem. a) no torneamento; b) no fresamento (DIN 6584, 1963).

2.7.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A FORÇA DE USINAGEM

As forças de usinagem dependem da resistência do material da peça no plano primário de cisalhamento, da área deste plano e também depende do contato entre o cavaco e a ferramenta. Segundo Trent (1984), neste contato pode ocorrer aderência e escorregamento. Assim as forças de usinagem são, indiretamente, também afetadas pelo contato cavaco-ferramenta.

Trabalhos experimentais mostram a influência dos principais parâmetros envolvidos no corte: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, estado de afiação da ferramenta e utilização de fluido de corte, (Machado, Gianini e Bohes, 1996; Machado, Gonçalves e Gianini, 1987).

Embora a força de avanço F_f não influencia o valor da potência de usinagem e a força passiva não toma parte ativa da determinação da potência, muitos fatores que influenciam os valores da força de corte F_c , também influenciam estas duas forças, onde pode-se destacar os mais marcantes como o raio de ponta da ferramenta e os ângulos de posição χ e de inclinação λ .

A veracidade destas influências foram comprovadas pelos ensaios de Meyer (1964), onde pode-se notar que conforme o raio de ponta cresce a força passiva

(denominada pelo autor como força de profundidade) aumenta significativamente e a força de avanço diminui conforme nos mostra a figura 2.15.

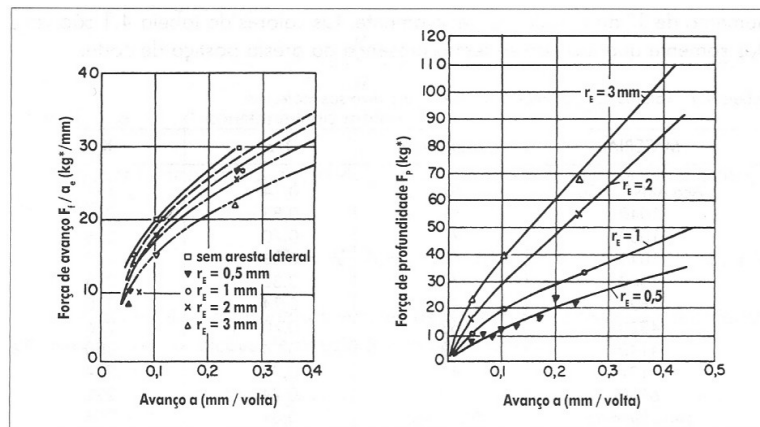


Figura 2.15 - Influência do raio de ponta da ferramenta nas forças de avanço e passiva (Meyer, 1964).

Com relação aos ângulos de posição e de inclinação, nota-se que o crescimento de χ gera um aumento da força de avanço, principalmente quando χ é pequeno e com a força passiva acontece o oposto ou seja, ela decresce sensivelmente com o aumento do ângulo de posição conforme a (figura 2.16). A influência do ângulo de inclinação nos valores da força passiva é inversa, isto é, a força de passiva cresce com a diminuição do ângulo de inclinação (figura 2.17).

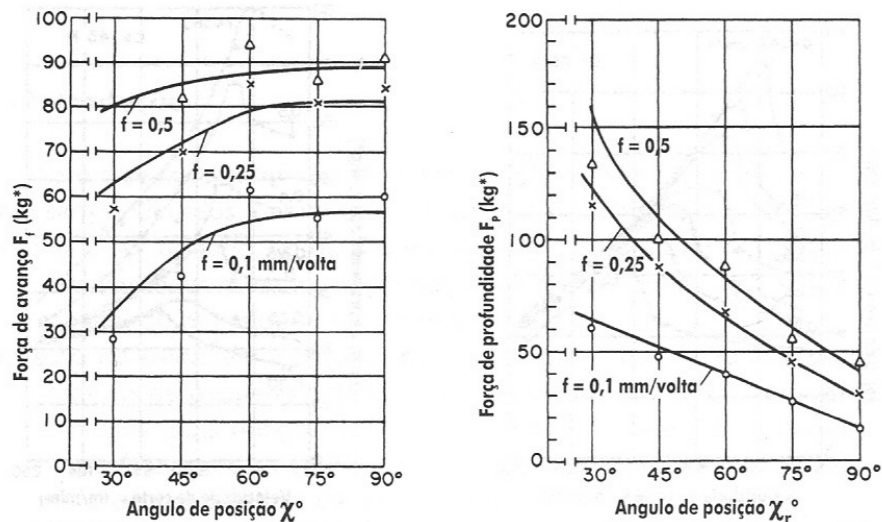


Figura 2.16 - Influência dos ângulos de posição nas forças de avanço e passiva (Meyer, 1964).

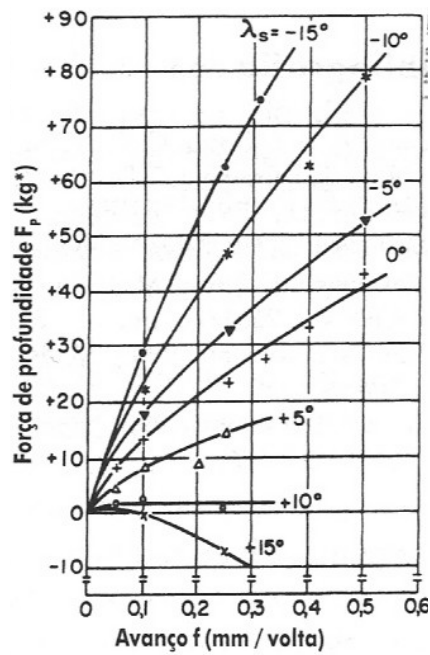


Figura 2.17 - Influência do Ângulo de Inclinação da Ferramenta na Força Passiva (Meyer, 1964).

2.7.3 PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

Segundo Ferraresi (1977), a pressão específica de corte, K_s , é definida como a relação entre a força de corte, F_c , e a área da secção de corte, A , assim:

$$K_s = \frac{F_c}{A} \quad (2.7)$$

Como $A = a_p \cdot f_c = b \cdot h$, nos casos de ferramentas sem arredondamento das pontas, temos:

$$K_s = \frac{F_c}{a_p \cdot f_c} \quad (2.8)$$

De acordo com Machado e da Silva (2004), a pressão específica de corte pode, também, ser entendida como sendo a energia efetiva consumida para arrancar uma unidade de volume de material da peça, assim:

$$K_s = \mu_e = \frac{F_c \cdot v_c}{v_c \cdot a_p \cdot f_c} = \frac{F_c}{a_p \cdot f_c} \quad (2.9)$$

Dentre os fatores que influenciam a pressão específica de corte, pode-se destacar: o material da peça, o material e a geometria da ferramenta, os ângulos de saída e de inclinação, ângulo de folga e de posição, afiação da ferramenta, velocidade de corte, fluído de corte e a rigidez da ferramenta.

A pressão específica de corte é considerada um bom índice de usinabilidade dos materiais, pois todos os fatores que alteram o valor da força de corte sem alterar o valor da área da secção de corte, alteram proporcionalmente o valor da pressão específica de corte, sendo o avanço o fator mais influente neste caso (Machado e Da Silva, 2004).

2.7.4 POTÊNCIA DE USINAGEM

As potências necessárias para a usinagem resultam como produtos das componentes da força de usinagem pelas respectivas componentes de velocidade.

- Potência de Corte (N_c)

$$N_c = F_c \cdot v_c \quad (2.10)$$

para F_c em [N] e v_c em [m/s], N_c é obtida em [W].

- Potência de Avanço (N_f)

$$N_f = F_f \cdot v_f \quad (2.11)$$

para F_c em [N] e v_f em [m/s].

- Potência Efetiva de Corte (N_e)

$$N_e = N_c + N_f \quad (2.12)$$

Da relação entre as potências de corte e de avanço observa-se que a maior parcela de potência efetiva de corte, N_e , é dada pela potência de corte, N_c , ou seja, a potência de avanço é muito pequena se comparada com a potência de corte (Diniz, 2000), sendo esta desprezível. Pode-se dizer com boa aproximação que a potência efetiva de corte é aproximadamente igual a potência de corte. Por esta razão a força de corte F_c , constituinte da maior parcela de potência de usinagem, é chamada força principal de corte (Ferraresi, 1977). Assim é comum estudar os efeitos dos parâmetros de corte na força de corte F_c .

2.8 TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM USINAGEM

As tensões no plano de cisalhamento primário podem ser calculadas usando as seguintes expressões:

Tensão Normal:

$$\sigma_s = \frac{F_{NZ}}{A_s} \quad (2.13)$$

Tensão cisalhante:

$$\tau_s = \frac{F_Z}{A_s} \quad (2.14)$$

Onde,

F_{NZ} e F_Z são as forças normal e tangencial, respectivamente, que atuam no plano de cisalhamento primário (conforme Figura 2.14). A_s é a área do plano de cisalhamento primário.

No corte ortogonal
$$A_s = \frac{A}{\sin \phi} = \frac{h \cdot b}{\sin \phi} .$$

Portanto, a força necessária para formar o cavaco depende da resistência ao cisalhamento do material nas condições de corte e da área do plano de cisalhamento.

As tensões no plano de cisalhamento secundário são de natureza compressiva e podem ser calculadas usando as seguintes expressões:

Tensão Normal:

$$\sigma_i = \frac{F_c}{A_c} \quad (2.15)$$

Tensão cisalhante:

$$\tau_i = \frac{F_f}{A_c} \quad (2.16)$$

Onde,

F_c e F_f são as forças normal e tangencial, respectivamente e A_c é a área de contato cavaco ferramenta.

Cálculos desenvolvidos por Zorev (1963) mostraram que a tensão normal de compressão tem uma distribuição parabólica, sendo zero no ponto onde o cavaco perde contato com a ferramenta, e assumindo valor máximo na aresta de corte. Ela pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\sigma_c = q \cdot x^y \quad (2.17)$$

Onde:

X é igual a distância da zona de contato, a partir do ponto onde o cavaco perde contato com a ferramenta.

Y e q são constantes.

Análise experimental de distribuição de tensões, utilizando técnicas fotoelásticas (Amini, 1968; Usui, 1960) ou um dinamômetro especial com uma ferramenta bi-partida (Barrow, 1982; Kato et al, 1972), mostraram resultados que confirmam que as tensões máximas se localizam realmente na aresta de corte, muito embora, algumas vezes a distribuição das tensões não são exatamente iguais àquelas calculadas por Zorev.

Quando se menciona deformação em usinagem, geralmente, ela é relacionada com a deformação no plano de cisalhamento primário (Figura 2.18), dada por:

$$\delta = \frac{\Delta S}{\Delta Y} = \frac{\cos(\gamma)}{\sin(\phi) \cdot \cos(\phi - \gamma)} \quad (2.18)$$

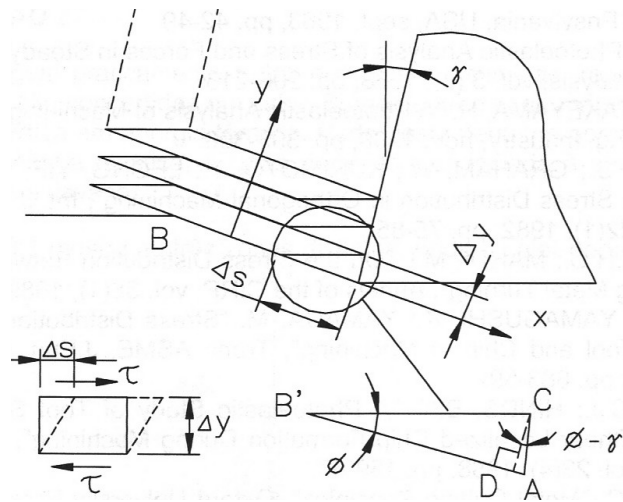


Figura 2.18 - Deformação no plano de cisalhamento primário (Shaw ,1984).

A quantidade de deformação que o material sofre no plano de cisalhamento primário é muito grande. Quando h' é pequeno, isto é, o grau de recalque é próximo da unidade, a deformação cisalhante é próxima do valor 2. Este valor pode subir para 5 ou mesmo maior, quando o grau de recalque é grande (Trent, 1988). Além disso, a taxa de deformação no plano de cisalhamento primário é da ordem de $1000s^{-1}$ ou maior (Shaw ,1984), que é um valor extremamente alto. Apesar de tudo isto, a abertura e a propagação de uma trinca ou mesmo a fratura, pode ser inibida pela ação da tensão de compressão.

Na zona de cisalhamento secundário, entretanto, dentro da zona de fluxo, as deformações são bem maiores que aqueles valores registrados dentro da zona de cisalhamento primário. (Trent, 1984), sugeriu o modelo apresentado através da figura 2.19, que segundo este as deformações aumentam à medida que o material se aproxima da interface cavaco-ferramenta, que teoricamente seria infinito na interface. Entretanto, devido a presença de irregularidades superficiais envolvidas existe uma interrupção no aumento exponencial da deformação. Desta maneira, o mesmo (Trent, 1984) sugere valores da ordem de 80 a 100 mm/mm de deformação dentro da zona de fluxo.

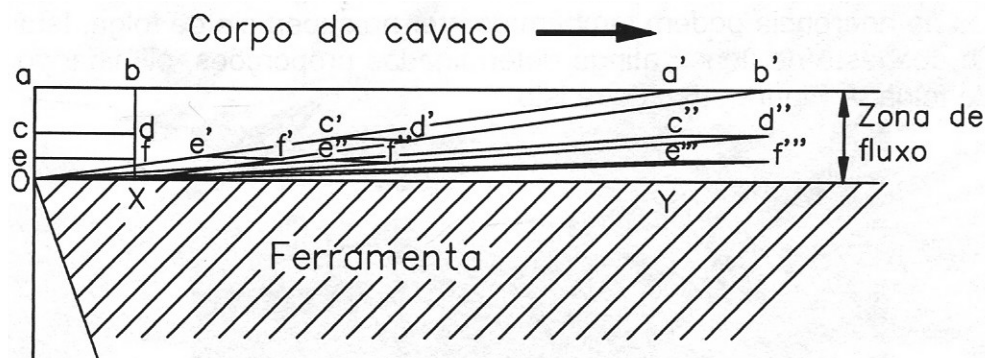


Figura 2.19 - Modelo de deformação na zona de fluxo (Trent, 1984).

2.9 FORÇA RESIDUAL

A maioria dos trabalhos em corte de metais admite o contato entre a face lateral da ferramenta somente se houver o desgaste de flanco e a ferramenta não for afiada. Portanto em uma operação de torneamento com uma ferramenta de corte simples três forças são consideradas: força de corte na direção de corte, força de avanço na direção de avanço e a força passiva na direção perpendicular ao avanço. Estas forças são consequência da força necessária para cisalhar o material no plano de cisalhamento primário, formar o cavaco, a nova superfície usinada e a força necessária para superar a resistência do movimento do cavaco na superfície de saída da ferramenta na zona de corte secundária. O contato na superfície de folga não é levado em conta em relação à distribuição de força.

Considerando que o material usinado é um material plástico perfeito, poderia haver alguma deformação elástica envolvida no processo. Na verdade a temperatura obtida na zona de fluxo e a alta taxa de deformação pode afetar o comportamento do material durante o corte. Devido aos elevados valores das taxas de deformações durante a usinagem, não existe nenhum modo de testar um material sob tais condições, pois o comportamento fundamental do material é desconhecido. Entretanto para a maioria dos materiais maleáveis durante o corte pode se considerar uma deformação elástica, que sugere um contato da superfície usinada com a face lateral da ferramenta, isto significa que a ferramenta precisa penetrar em uma profundidade específica dentro do material antes de começar a cortá-lo, ou seja existe uma profundidade mínima que dependerá de muitos fatores, mas principalmente das propriedades do material. Para valores menores do que este mínimo o material não cortará, será apenas deformado elasticamente.

Alguns autores nomearam esta força devido ao contato entre a superfície da peça usinada e a face lateral da ferramenta como força residual (Albrecht, 1960), e

acreditam que elas são independentes da velocidade de avanço, podendo ser calculada por meio de extrapolação de uma curva de força de corte para uma velocidade de avanço zero.

No corte ortogonal quando a ferramenta toca a peça, antes de começar a cortar, algumas deformações elásticas acontecem, assim que a ferramenta avança em direção à peça; o limite elástico do material é alcançado e começa a fluir plasticamente. Neste ponto não há nenhuma deformação plástica do material e sim um afastamento elástico, conseqüentemente sem nenhum corte. Eventualmente o ponto de deformação plástica é alcançado acima da aresta de corte quando o material é forçado a cortar na mesma direção do plano de cisalhamento primário e, então começa a formação do cavaco. Este contato com a face lateral da ferramenta tem um grande efeito na usinagem, principalmente na zona de cisalhamento secundário conforme figura 2.20 (Da Silva, 1998).

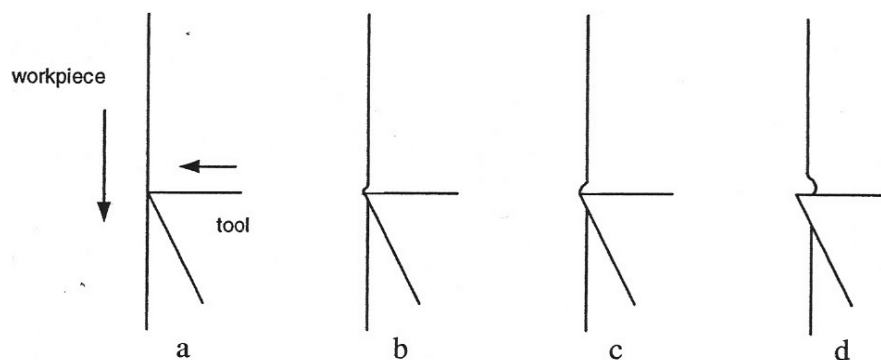


Figura 2.20 - Início do corte: a) ferramenta toca a peça; b) deformação elástica; c) deformação plástica; d) próximo de começar o corte (Da Silva, 1998) .

Após o início do corte, o contato da face lateral da ferramenta com a peça pode ou não continuar, independente do que acontece acima da aresta de corte. Wallbank (1978), encontrou evidência deste contato abaixo da aresta de corte, na usinagem de materiais diferentes, sugerindo que o contato ainda pode existir durante o corte.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Serão abordados neste capítulo os procedimentos experimentais utilizados neste trabalho.

Na primeira parte dos ensaios foram realizados testes de usinagem utilizando o processo de torneamento cilíndrico externo, em peças de aço ABNT 1045 e ferro fundido nodular com profundidade de corte fixa e igual a 1 mm, foram variados a velocidade de corte, o avanço, a aplicação de fluido de corte e o revestimento da ferramenta. Em todos os testes foi monitorada a força de corte F_c , utilizando um dinamômetro piezoelétrico, conforme ilustra a figura 3.1. Foram colhidas amostras do cavaco formado em todos os testes para análise do tipo de cavaco, forma e medição da espessura. A espessura foi medida utilizando micrômetro Mitutoyo de resolução 0,01 mm.

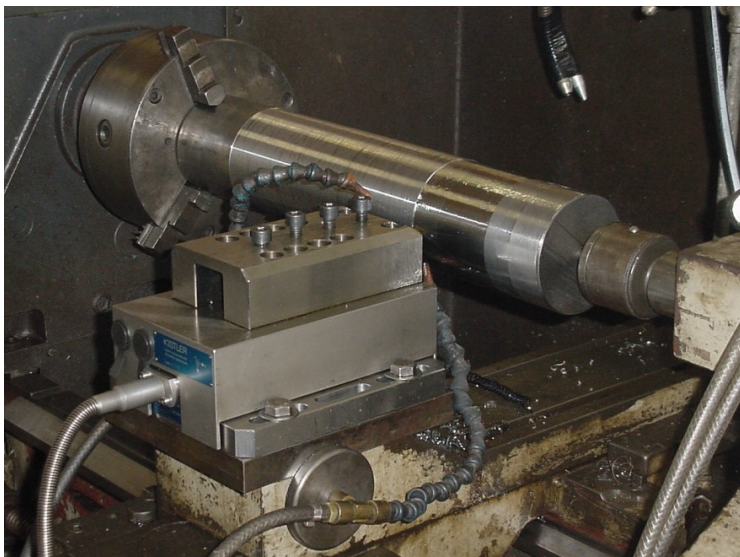


Figura 3.1 - Sistema peça-máquina e dinamômetro utilizado no torneamento.

Na segunda parte dos ensaios os experimentos foram realizados no centro de usinagem discovery 760. Foram realizados ensaios para simulação do corte ortogonal em baixas velocidades de corte, para isto, foi projetada e fabricada uma peça de formato adequado para ser fixado no dinamômetro piezoelétrico. A figura 3.2 ilustra a peça com as dimensões.



Figura 3.2 - Dispositivo desenvolvido e fixado no dinamômetro.

Nestes testes foram utilizadas apenas peças de aço ABNT 1045 e ferramentas de aço rápido. Neste caso a velocidade de corte era a velocidade de avanço da mesa da fresadora e foram utilizadas as seguintes condições de corte: $v_c = 150 \text{ mm/min}$, $a_p = 3 \text{ mm}$, $h = 1 \mu\text{m}$ a $h = 30 \mu\text{m}$, $\alpha_0 = 5^\circ$ e $\gamma_0 = 0^\circ$. Durante a montagem da peça foi feito um controle de paralelismo entre a peça e a ferramenta, utilizando um relógio comparador de $0,001 \text{ mm}$.

A figura 3.3 mostra um fluxograma das etapas do procedimento experimental.

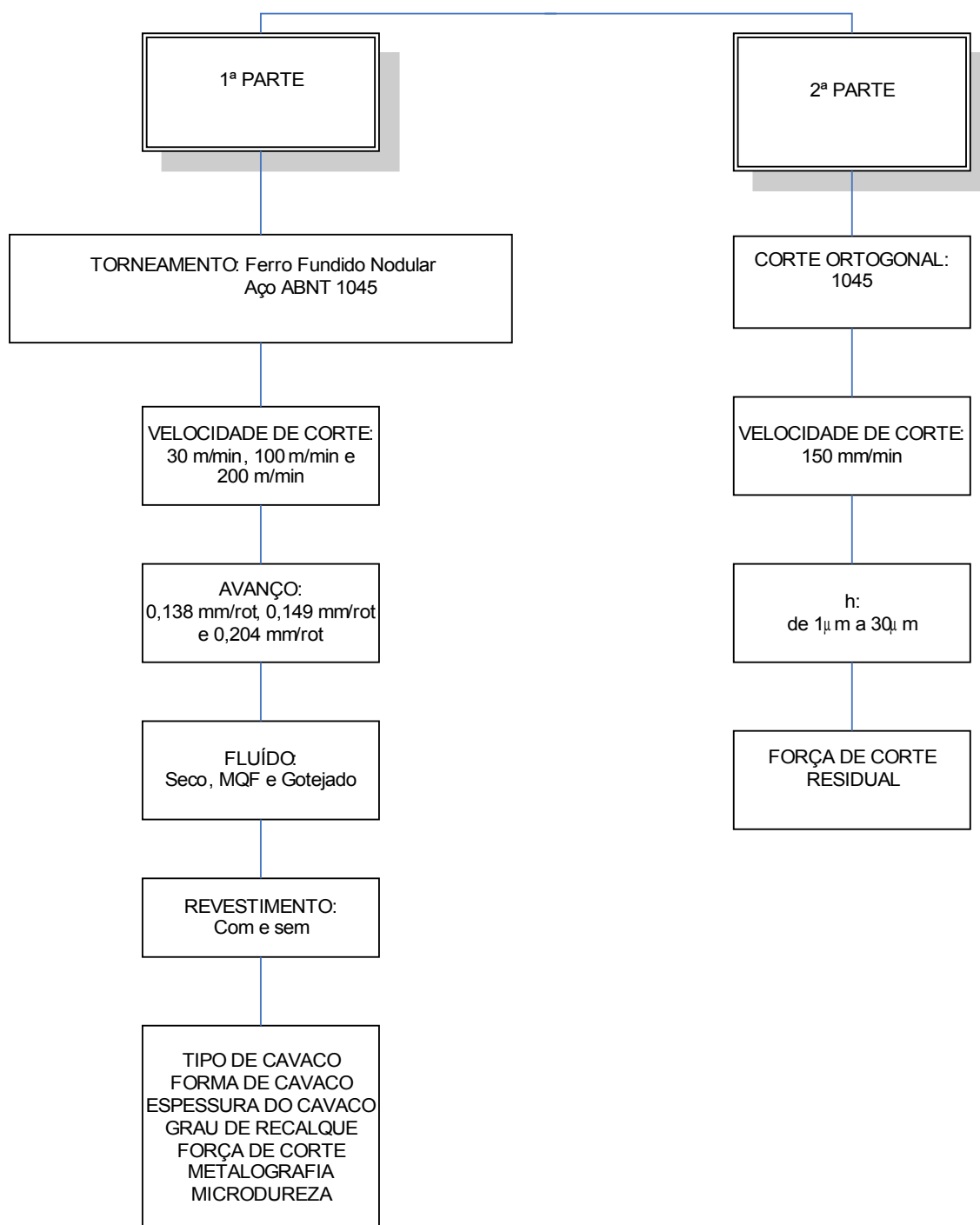


Figura 3.3 – Fluxograma representativo das etapas desenvolvidas.

Este procedimento experimental foi desenvolvido e realizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, no Laboratório de Metrologia, no Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU e no Laboratório de Materiais do CEFET – GO, em Goiânia.

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Foram definidos os quatro parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço, fluído de corte e revestimento da ferramenta e pré-estabelecido as variações para cada teste, conforme a tabela 3.1.

Material	Velocidade de corte m/min	Avanço mm/rot	Fluído de corte	Revestimento
Aço 1045	30	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	100	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	200	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
FoFo Nodular	30	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	100	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	200	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com

Tabela 3.1 - Parâmetros e variações utilizados nos testes.

De acordo com a tabela 3.1, após estabelecidos os parâmetros e as variações, observa-se que o número de ensaios foram: 54 para o aço ABNT 1045 e 54 para o ferro fundido nodular , totalizando 108 testes nos ensaios de usinagem no torneamento. Já nos ensaios de usinagem no corte ortogonal foram feitos 60 testes, onde variou-se apenas os valores de (h).

3.2 MATERIAL USINADO

Os materiais selecionados para estudo são: o aço ABNT 1045 e o ferro fundido nodular. O ABNT 1045 possui dureza média de 206 HV e sua composição química é apresentada na tabela 3.2, fornecida pelo fabricante Aços Vilarés S.A. A figura 3.3 nos mostra uma fotografia da sua microestrutura.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	P	S
0,48	0,24	0,70	0,10	0,07	0,02	0,04	0,027	0,024	0,020

Tabela 3.2 - Composição química (% em massa) do material utilizado nos ensaios (Reis,2000)

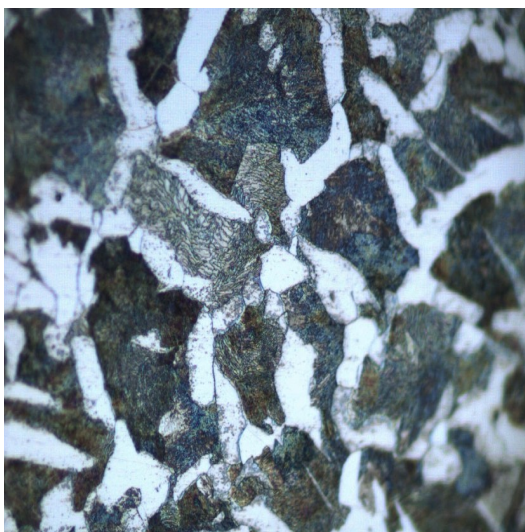


Figura 3.4 - Fotografia ilustrativa da microestrutura do aço ABNT 1045 utilizado nos testes (ampliação 500 vezes).

O ferro fundido nodular possui dureza média de 240 HV, é também chamado de ferro fundido dúctil. É obtido pela adição de pequena quantidade de magnésio ou de cério no ferro fundido de alto carbono em estado líquido, conforme a tabela 3.3 (Ferraresi - 1969). A figura 3.4, nos mostra uma fotografia da sua microestrutura.

C	Si	Mn	P	S
3,0 - 4,0 %	1,8 - 2,8 %	0,1 - 1,0 %	0,01 - 0,1 %	0,01 - 0,03 %

Tabela 3.3 - Composição química do fofo nodular utilizado nos ensaios (Ferraresi, 1969).

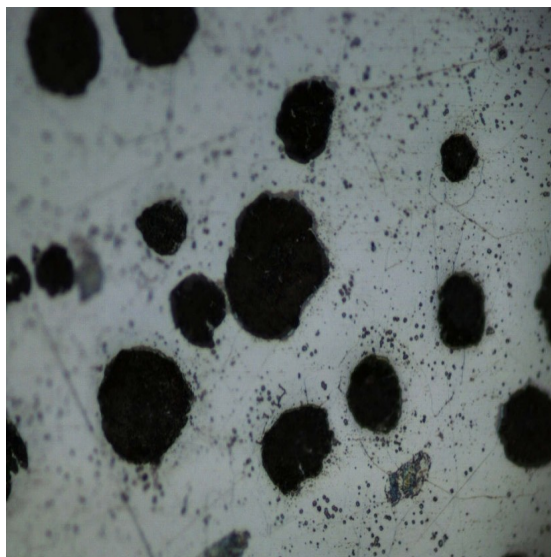


Figura 3.5 - Fotografia ilustrativa da microestrutura do FOFO nodular utilizado nos testes (ampliação 500 vezes).

3.3 MÁQUINA FERRAMENTA UTILIZADA

Na primeira parte dos ensaios foi utilizado um torno mecânico IMOR modelo MAXI-II-520, com potência máxima de 4,42 kw (6,0 CV), características operacionais de 12 rotações, entre 28 rpm e 1400 rpm, e 20 avanços longitudinais, entre 0,095 mm/volta e 1,939 mm/volta e resolução do ajuste de penetração transversal da ferramenta de 0,05 mm no diâmetro, por divisão do colar, conforme mostra a figura 3.6.



Figura 3.6 - Torno mecânico IMOR modelo MAXI-II-520.

Na segunda parte dos ensaios foi utilizado um centro de usinagem vertical CNC da linha Discovery modelo 760 com comando numérico Siemens 810. A potência do motor principal e a potência total instalada são de 9 KW e 15 KVA, respectivamente. Esta máquina, fabricada pela Indústrias Romi S.A, possui rotação máxima no eixo-árvore de 10.000 rpm, conforme mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7 - Centro de usinagem vertical CNC utilizado no teste de usinagem no corte ortogonal

3.4 FERRAMENTAS UTILIZADAS

No torneamento foram utilizadas pastilhas de metal duro sem revestimento , de especificação SPUN 120308 CDC P10 (Brassinter) , pastilhas de metal duro revestidas com TIN, de especificação SPUN 120308 MC7035 CDC P10 (Brassinter), montadas em um suporte CSBPR 2020 K12, resultando nos parâmetros geométricos principais:

- Ângulo de posição (χ_r) = 75°
- Ângulo de saída (γ_0) = 6°
- Ângulo de inclinação (λ_s) = 0°

Os insertos são quadrados sem quebra cavacos com ângulo de folga de 10° e ângulo de saída de 0° (fora do suporte).

Na simulação do torneamento nos ensaios de usinagem no corte ortogonal foi utilizado uma ferramenta de aço rápido (HSS), com ângulo de folga (α_0) igual à 5° e ângulo de saída (γ_0) igual à 0° .

3.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Para observação da microestrutura e medição da microdureza, amostras de cavaco foram embutidas utilizando o método de embutimento a frio, com resina de acrílico auto polimerizante.

Os embutimentos eram realizados em formas redondas de alumínio. Após a cura, as amostras eram lixadas utilizando lixas nº 250, 300, 400 e 600, nessa ordem. Em seguida eram polidos utilizando pasta de diamante de granulometria de $1\mu\text{m}$. Para revelação da microestrutura as amostras eram atacadas quimicamente com nital 2%.

3.6 MEDIÇÃO DA MICRODUREZA

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com carga de 1kg e cinco identações para cada amostra, onde posteriormente se fez uma média de dureza. O equipamento utilizado foi identador modelo HM - 102, fabricado pela Mitutoyo, com divisão mínima de 0,01mm e área 100 mm x 100 mm, conforme a figura 3.8.

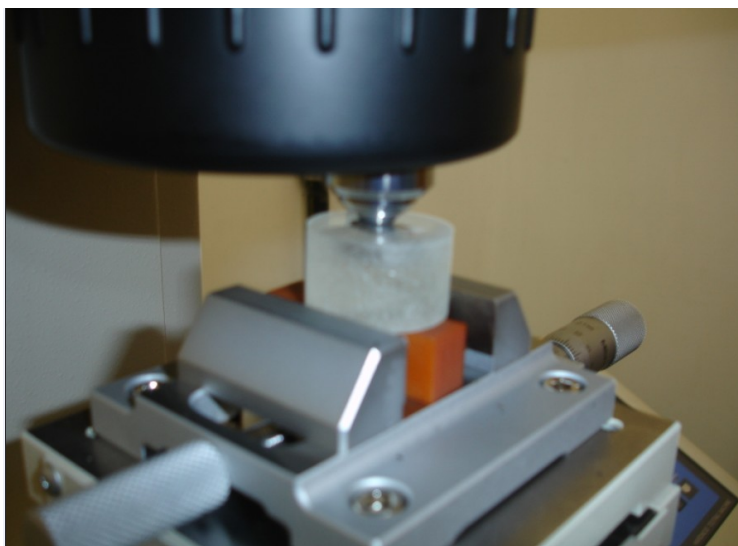


Figura 3.8 - Equipamento para aquisição de microdureza.

3.7 MEDIÇÃO DAS FORÇAS (DE CORTE E RESIDUAL)

As forças de corte e residual foram medidas nos ensaios de usinagem no torneamento e no corte ortogonal com o auxílio de um dinamômetro Kistler tipo 9265B e um amplificador de sinais Kistler tipo 5019A. Foram utilizados um microcomputador e uma placa de aquisição de sinais para obtenção e armazenamento dos dados, utilizando software LabView.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos durante o procedimento experimental. A primeira etapa dos ensaios de torneamento cilíndrico externo foi feita com aço ABNT 1045 e a segunda com fofo nodular ambos com ferramentas de metal duro. Na seqüência foi feito uma análise visual da forma do cavaco formado, em função das variáveis de corte pré-estabelecidas nos ensaios, visto que quanto ao tipo ambos se apresentaram contínuos. Em seguida foi feita uma análise a partir da significância dos parâmetros de corte e finalmente o estudo relativo às forças de avanço residuais propostas apenas para o ABNT 1045.

4.1 FORMAS DOS CAVACOS

Após exame visual das amostras dos cavacos colhidos nos ensaios, foi feita uma classificação de acordo com o material e as condições de teste correspondentes.

A tabela 4.1 nos mostra a classificação dos cavacos do aço ABNT 1045 quanto a sua forma nos ensaios com ferramenta de metal duro sem revestimento e condições de teste correspondentes.

Tabela 4.1. Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas sem revestimento.

Fluído	Avanço (mm/rot)	Vc (m/min)	Forma
Seco	0,138	30	Arco solto
Seco	0,138	100	Arco solto
Seco	0,138	200	Helicoidal arruela longo
Seco	0,149	30	Arco solto
Seco	0,149	100	Arco solto e Fita emaranhado
Seco	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	30	Arco solto e Tubular curto
Seco	0,204	100	Arco solto e Hel. Arruela emar.
Seco	0,204	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
MQF	0,204	30	Espiral cônico
MQF	0,204	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	30	Tubular curto
Gotejado	0,138	100	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,138	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	30	Tubular curto
Gotejado	0,149	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,204	30	Helicoidal arruela curto
Gotejado	0,204	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,204	200	Helicoidal arruela longo

A tabela 4.2 nos mostra a classificação dos cavacos do aço ABNT 1045 quanto a sua forma nos ensaios com ferramenta de metal duro com revestimento e condições de teste correspondentes.

Tabela 4.2. Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas revestidas.

Fluído	Avanço (mm/rot)	Vc (m/min)	Forma
Seco	0,138	30	Helicoidal arruela longo
Seco	0,138	100	Helicoidal arruela longo
Seco	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,149	30	Helicoidal arruela longo
Seco	0,149	100	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	30	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	100	Helicoidal arruela longo
Seco	0,204	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	30	Tubular curto
MQF	0,204	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	30	Tubular curto
Gotejado	0,138	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,149	30	Tubular curto
Gotejado	0,149	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,204	30	Arco solto
Gotejado	0,204	100	Fita emaranhado
Gotejado	0,204	200	Helicoidal arruela longo

O mesmo exame visual e classificação dos cavacos foram feitos sob condições semelhantes para o ferro fundido nodular.

A tabela 4.3 nos mostra a classificação dos cavacos do ferro fundido nodular quanto a sua forma nos ensaios com ferramenta de metal duro sem revestimento e condições de teste correspondentes.

Tabela 4.3. Formas dos cavacos e condições de corte do ferro fundido nodular para ferramentas sem revestimento.

Fluído	Avanço (mm/rot)	Vc (m/min)	Forma
Seco	0,138	30	Espiral cônico
Seco	0,138	100	Tubular curto
Seco	0,138	200	Tubular curto
Seco	0,149	30	Espiral cônico
Seco	0,149	100	Tubular curto
Seco	0,149	200	Tubular curto
Seco	0,204	30	Espiral cônico
Seco	0,204	100	Tubular curto
Seco	0,204	200	Espiral cônico
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Espiral cônico
MQF	0,138	200	Espiral cônico
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Espiral cônico
MQF	0,149	200	Espiral cônico
MQF	0,204	30	Espiral cônico
MQF	0,204	100	Espiral cônico
MQF	0,204	200	Espiral cônico
Gotejado	0,138	30	Espiral cônico
Gotejado	0,138	100	Tubular curto
Gotejado	0,138	200	Tubular curto
Gotejado	0,149	30	Espiral cônico
Gotejado	0,149	100	Tubular curto
Gotejado	0,149	200	Tubular curto
Gotejado	0,204	30	Espiral plano
Gotejado	0,204	100	Espiral cônico
Gotejado	0,204	200	Espiral cônico

A tabela 4.4 nos mostra a classificação dos cavacos do ferro fundido nodular quanto a sua forma nos ensaios com ferramenta de metal duro com revestimento e condições de teste correspondentes.

Tabela 4.4. Formas dos cavacos e condições de corte do ferro fundido nodular para ferramentas revestidas.

Fluído	Avanço (mm/rot)	Vc (m/min)	Forma
Seco	0,138	30	Espiral cônico
Seco	0,138	100	Tubular curto
Seco	0,138	200	Tubular curto
Seco	0,149	30	Espiral cônico
Seco	0,149	100	Tubular curto
Seco	0,149	200	Tubular curto
Seco	0,204	30	Espiral cônico
Seco	0,204	100	Tubular curto
Seco	0,204	200	Tubular curto
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Tubular curto
MQF	0,138	200	Tubular curto
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Tubular curto
MQF	0,149	200	Tubular curto
MQF	0,204	30	Espiral cônico
MQF	0,204	100	Espiral cônico
MQF	0,204	200	Espiral cônico
Gotejado	0,138	30	Espiral plano
Gotejado	0,138	100	Tubular curto
Gotejado	0,138	200	Espiral cônico
Gotejado	0,149	30	Espiral cônico
Gotejado	0,149	100	Espiral cônico
Gotejado	0,149	200	Espiral cônico
Gotejado	0,204	30	Espiral cônico
Gotejado	0,204	100	Espiral cônico
Gotejado	0,204	200	Espiral cônico

Embora no aço ABNT 1045 a forma do cavaco tenha sido predominantemente de cavacos helicoidais longos, em algumas situações ele passou de helicoidal para espiral ou tubular e de longo para curto. Percebe-se que com a utilização de fluído de corte, para ferramenta sem revestimento, predomina a forma helicoidal.

Quando se utiliza a ferramenta revestida, com exceção de seis condições de corte, os cavacos são helicoidais. Isto mostra que a forma do cavaco está relacionada com a interface cavaco ferramenta, região onde o fluido e o revestimento tem efeito.

Observando-se a tabelas 4.1 e 4.2, verifica-se que, com a utilização de ferramenta sem revestimento temos um aumento razoável na quantidade de cavacos curtos, se comparado a mesma ferramenta com revestimento. Nota-se também nas tabelas 4.1 e 4.2 que esta leve modificação ocorreu principalmente com a diminuição dos avanços e das velocidades. O fluido não teve uma influência significativa, pois para uma mesma condição variando-se alguns parâmetros de corte ocorria a alteração na forma do cavaco. Os cavacos helicoidais e longos predominaram na maioria dos ensaios, com ênfase nas velocidades de 100 m/min e 200 m/min e os avanços de 0,149 mm/rot e 0,204 mm/rot.

Na usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta de metal duro sem revestimento os cavacos se apresentaram mais curtos na forma espiral e pode-se destacar a presença de algumas formas tubulares para as velocidades de 100 m/min e 200 m/min e avanços de 0,138 m/rot, 0,149 m/rot e 0,204 m/rot. O mesmo aconteceu na usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta de metal duro revestida, cavacos curtos predominaram na forma de espiral e a forma tubular se apresentou nas velocidades de 100 m/min e 200 m/min e avanços 0,138 m/rot, 0,149 m/rot e 0,204 m/rot nas condições a seco e com MQF. Na usinagem com fluido gotejado houve um predomínio de cavacos na forma espiral cônica para todos os avanços propostos. Este material não forma cavaco longo, devido a sua natureza mais frágil. O cavaco tende a enrolar em forma espiral e logo se quebra.

4.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA E RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE MICRODUREZA

Foram embutidos cavacos de aço ABNT 1045 e ferro fundido nodular em todas as condições onde os avanços e as velocidades eram extremos, ou seja, todos os ensaios com avanço 0,204 mm/rot e velocidade 200 m/min. A figura 4.1 mostra a secção do cavaco formado do aço ABNT 1045 com ferramenta sem revestimento e aplicação de MQF.

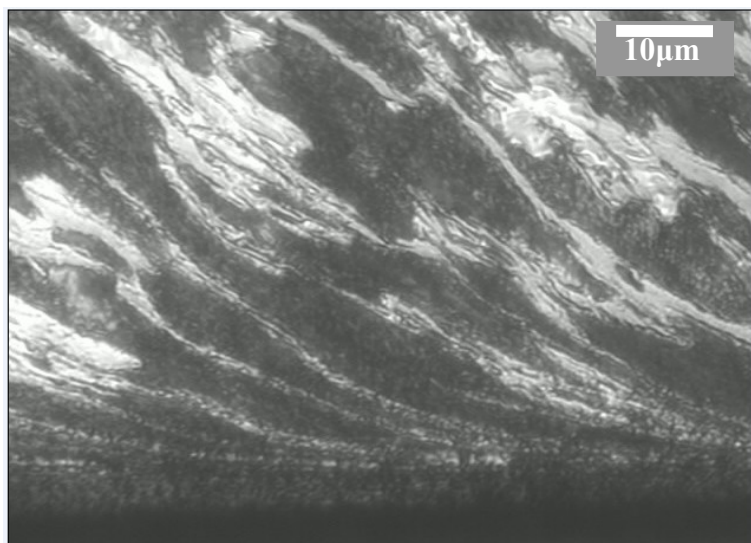


Figura 4.1 - Secção do cavaco do aço ABNT 1045.

Foi verificada uma grande quantidade de deformação plástica pela observação da superfície de corte no cavaco com grafitas bastante alongadas, orientadas paralelas à zona de cisalhamento primária. O cavaco saiu com uma velocidade aproximada de 85 m/min e a distância média entre duas lamelas foi de 0,033 mm em um intervalo de tempo de $2,3 \cdot 10^{-5}$ s. Todos os cavacos em todas as condições apresentaram-se na forma helicoidal arruela longo.

A análise do cavaco de ferro fundido nodular também revelou grande quantidade de deformação plástica e o alongamento das grafitas, no entanto apenas com a utilização de ferramenta com revestimento a seco o cavaco se apresentou de forma tubular curto e sua micrografia pode ser observada na figura 4.2, no restante dos ensaios foi observada a forma de espiral cônico. O cavaco do ferro fundido nodular saiu com uma velocidade maior que a do aço ABNT 1045, em torno de 97 m/min e consequentemente a distância média entre duas lamelas também aumentaram, atingindo 0,243 mm em um intervalo de tempo de $1,5 \cdot 10^{-4}$ s.

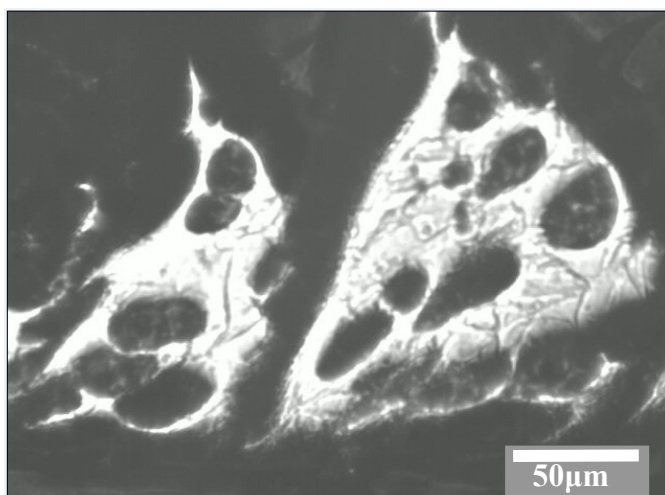


Figura 4.2 - Cavaco ferro fundido nodular.

A alta deformação na estrutura do cavaco pode ser verificada através da distribuição da dureza, que no aço ABNT 1045 revelou valores na faixa de 310 – 400 HV no cavaco e 210 – 234 no material da peça e no ferro fundido nodular na faixa de 151 – 295 HV no cavaco e 142 – 250 no material da peça. A tabela 4.5 nos mostra os resultados das durezas médias obtidas para os materiais em bruto de aço ABNT 1045 e ferro fundido nodular, após cinco identificações, feitas aleatoriamente para cada material.

Tabela 4.5. Resultados de dureza média materiais em bruto.

	1045 (em bruto)		FOFO NODULAR (em bruto)
Identação	HV	Identação	HV
1	210	1	250
2	234	2	142
3	227	3	153
4	214	4	196
5	214	5	166
Media (HV)	219,8	Media (HV)	181,4

A tabela 4.6 apresenta o número de identações e os valores de dureza média nos cavacos do aço ABNT 1045 e as condições apresentadas nos ensaios.

Tabela 4.6 Dureza média cavacos aço ABNT 1045.

	1045 - CR - seco (cavaco)		1045 - SR - seco (cavaco)
Identação	HV	Identação	HV
1	327	1	337
2	344	2	352
3	345	3	338
4	348	4	327
5	352	5	331
Media (HV)	343,2	Media (HV)	337
	1045 - SR - Gotej (cavaco)		1045 - CR - Gotej (cavaco)
Identação	HV	Identação	HV
1	310	1	332
2	331	2	341
3	367	3	323
4	350	4	340
5	335	5	340
Media (HV)	338,6	Media (HV)	335,2
	1045 - SR - MQF (cavaco)		1045 - CR - MQF (cavaco)
Identação	HV	Identação	HV
1	350	1	335
2	339	2	350
3	348	3	334
4	340	4	334
5	400	5	349
Media (HV)	355,4	Media (HV)	340,4

A tabela 4.7 apresenta o número de identações e os valores de dureza média nos cavacos do ferro fundido nodular e as condições apresentadas nos ensaios.

Tabela 4.7 Dureza média cavacos ferro fundido nodular

	FOFO N - CR - seco (cavaco)		FOFO N - SR - seco (cavaco)
Identação	HV	Identação	HV
1	181	1	260
2	151	2	224
3	252	3	214
4	205	4	247
5	251	5	192
Media (HV)	208	Media (HV)	227,4
	FOFO N - SR - Gotej (cavaco)		FOFO N - CR - Gotej (cavaco)
Identação	HV	Identação	HV
1	226	1	254
2	255	2	267
3	295	3	199
4	235	4	246
5	282	5	246
Media (HV)	258,6	Media (HV)	242,4
	FOFO N - CR - MQF (cavaco)		FOFO N - SR - MQF (cavaco)
Identação	HV	Identação	HV
1	177	1	187
2	258	2	295
3	252	3	182
4	261	4	236
5	291	5	174
Media (HV)	247,8	Media (HV)	214,8

Foi observado que o aumento da dureza é significamente maior nos cavacos de aço ABNT 1045 com relação ao material em bruto do que o aumento da dureza dos cavacos de ferro fundido nodular com relação ao material em bruto.

4.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE (V_c) E DO AVANÇO (f)

Os gráficos das figuras 4.3(a) e 4.3(b) mostram o efeito da velocidade de corte e do avanço na espessura do cavaco formado na usinagem a seco do aço ABNT 1045. Nota-se que o avanço é determinante no aumento da espessura, ou seja, com o aumento do avanço temos o aumento da espessura que atinge valores máximos entre 0,5 mm e 0,6 mm e o aumento da velocidade significa uma diminuição da espessura dos cavacos encontrados.

É sabido que o aumento na velocidade de corte irá proporcionar a redução do comprimento de contato cavaco-ferramenta na interface. Uma diminuição da espessura do cavaco (h') proporciona uma diminuição no grau de recalque e, portanto aumento no ângulo de cisalhamento (Machado e Da Silva, 2004). Todos esses fatores indicam uma menor deformação na zona de cisalhamento primária e com isto os cavacos se tornaram mais flexíveis para velocidade de corte 200 m/min e todos os avanços verificados, conforme mostram as figuras 4.3(a) e 4.3(b). A medida que os avanços diminuem, as espessuras encontradas também diminuíram e portanto os cavacos adquiridos se tornaram mais difíceis de quebrarem predominando uma produção de cavacos contínuos e helicoidais longos.

De um modo geral observa-se que o revestimento apresentou maior influência para usinagem com pequenas velocidades e grandes avanços, diminuindo o contato cavaco ferramenta e conseqüentemente as deformações, diminuindo a espessura do cavaco e tornando- os mais fáceis de se curvar, mesmo assim se manteve contínuo e helicoidal longo.

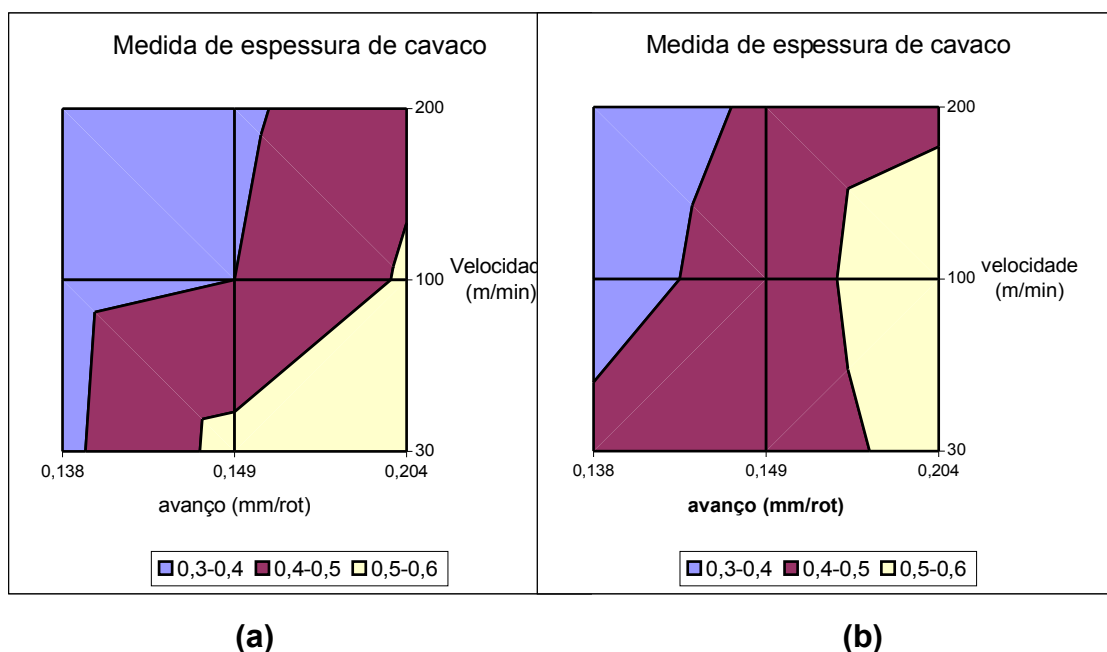


Figura 4.3: Gráfico bi-dimensional da espessura de cavaco em função da velocidade de corte e do avanço, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

As figuras 4.4(a) e 4.4(b) mostram o efeito da velocidade de corte e do avanço na espessura do cavaco formado na usinagem com aplicação de MQF do aço ABNT 1045. A aplicação de MQF reduziu os valores das espessuras dos cavacos comparados com a usinagem a seco, nas mesmas condições de corte conforme figuras 4.3(a) e 4.3(b). A influência do fluido é maior para baixas velocidades de corte e grandes avanços. A forma dos cavacos encontrados foram predominantemente helicoidais arruela e longos para todos os parâmetros verificados exceto para velocidade 30 m/min e avanço 0,138 mm/rot que em ambos os casos com e sem revestimento se caracterizaram com formas espirais e cônicas.

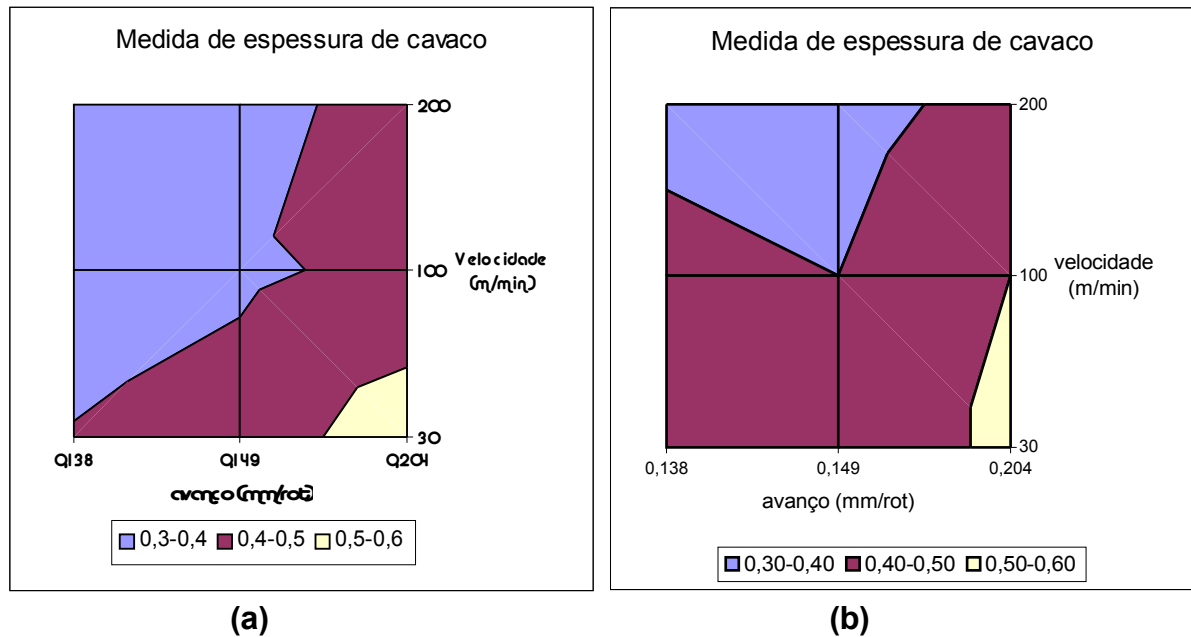


Figura 4.4: Gráfico bi-dimensional da espessura de cavaco em função velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de MQF, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

As figuras 4.5(a) e 4.5(b) mostram o efeito da velocidade de corte e do avanço na espessura do cavaco formado na usinagem com aplicação de fluido gotejado do aço ABNT 1045. Com a aplicação de fluido gotejado e utilização de ferramenta revestida foram obtidos os maiores valores de espessuras de todas as condições, quando comparadas a condição a seco e aplicação de MQF, as espessuras atingiram valores extremos que variaram entre 0,6 mm e 0,7 mm e os cavacos apresentaram formas bem definidas como arco solto.

Para ferramentas revestidas e baixos avanços, o efeito do fluido neste caso foi muito pequeno. Diferente da usinagem com ferramenta sem revestimento, onde os cavacos para os menores avanços aumentaram.

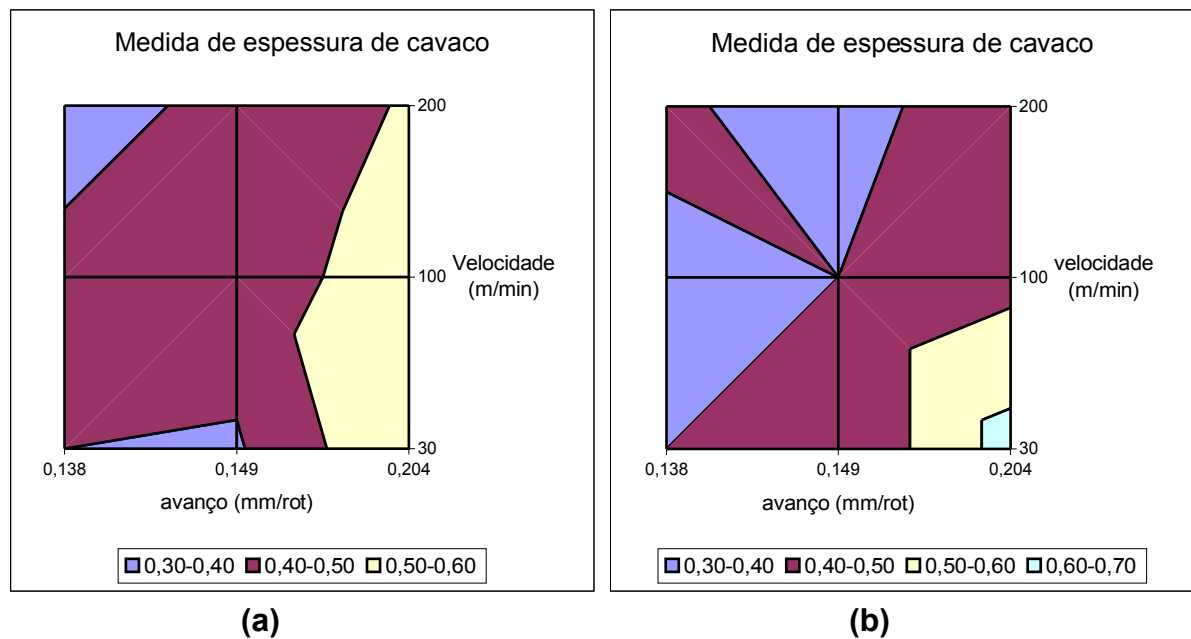


Figura 4.5: Gráfico bi-dimensional da espessura de cavaco em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de fluido gotejado, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

O grau de recalque é um parâmetro mais interessante para avaliar a usinabilidade do par ferramenta peça. Geometricamente, a espessura do cavaco tem que aumentar com o aumento do avanço. Assim, o grau de recalque pode ser um parâmetro melhor para avaliar o efeito das condições de corte, já que é relativo à espessura do cavaco.

As figuras 4.6(a) e 4.6(b) mostram o efeito da velocidade de corte e do avanço no grau de recalque na usinagem a seco do aço ABNT 1045. A figura 4.6(a) mostra que para o avanço 0,149 mm/rot e velocidade 30 m/min o grau de recalque atingiu valores máximos entre 3,0 e 3,2.

Neste caso, o efeito da velocidade de corte é maior que o avanço. O grau de recalque diminui com a velocidade de corte. A usinagem com utilização de ferramenta revestida de um modo geral proporciona um aumento do grau de recalque cujos valores variam entre 2,8 e 3,0, no entanto para velocidade máxima de 200 m/min e avanço máximo de 0,204 mm/rot o grau de recalque atinge valores mínimos entre 2,2 e 2,4 conforme mostra a figura 4.6(b).

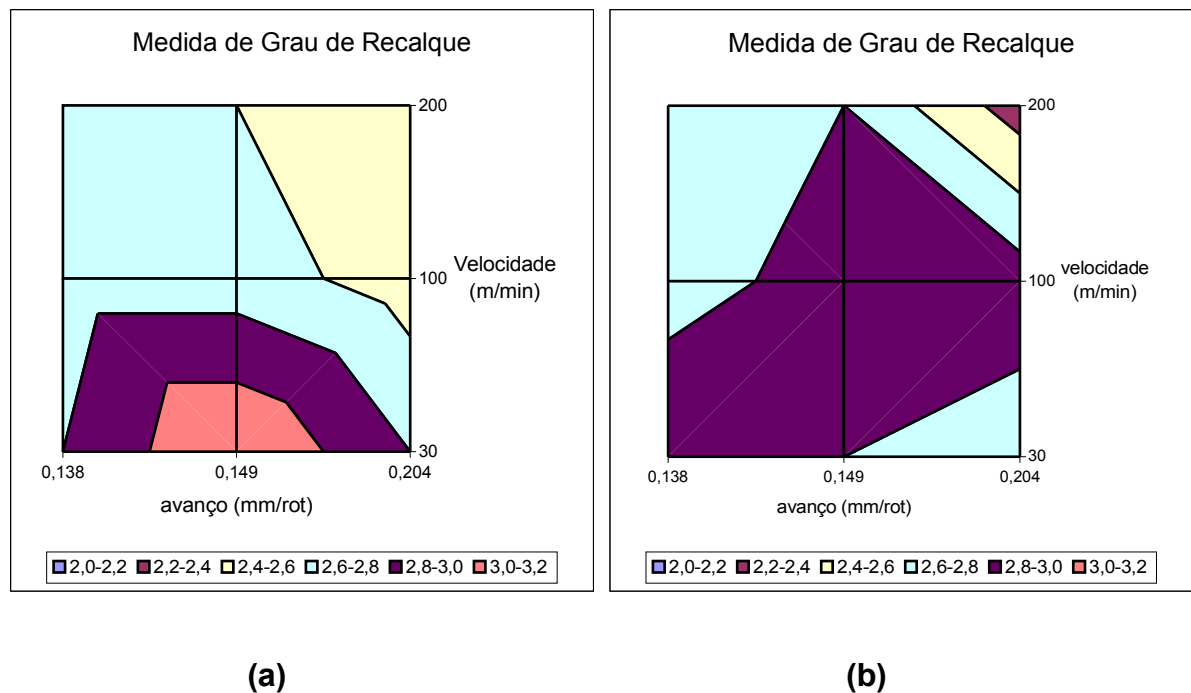


Figura 4.6: Gráfico bi-dimensional do grau de recalque em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem a seco, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

As figuras 4.7(a) e 4.7(b) mostram o efeito da velocidade de corte e do avanço no grau de recalque na usinagem com aplicação de MQF do aço ABNT 1045. Nestas condições verificou-se que a utilização de ferramenta sem revestimento resultou valores mínimos de grau de recalque entre 2,0 e 2,2 para velocidade 100 m/min e avanço 0,204 mm/rot, além de apresentar valores constantes entre 2,2 e 2,4 para velocidade 200 m/min em qualquer avanço verificado, conforme mostra a figura 4.7(a). Comparando as figuras 4.6(a) e 4.7(a), percebe-se que a aplicação de fluido por MQF diminui o grau de recalque e este efeito é maior para velocidades de corte maiores.

A combinação MQF e revestimento parece ter uma influência bem marcante. Neste caso a velocidade de corte pouco alterou a grau de recalque, principalmente para os maiores avanços utilizados.

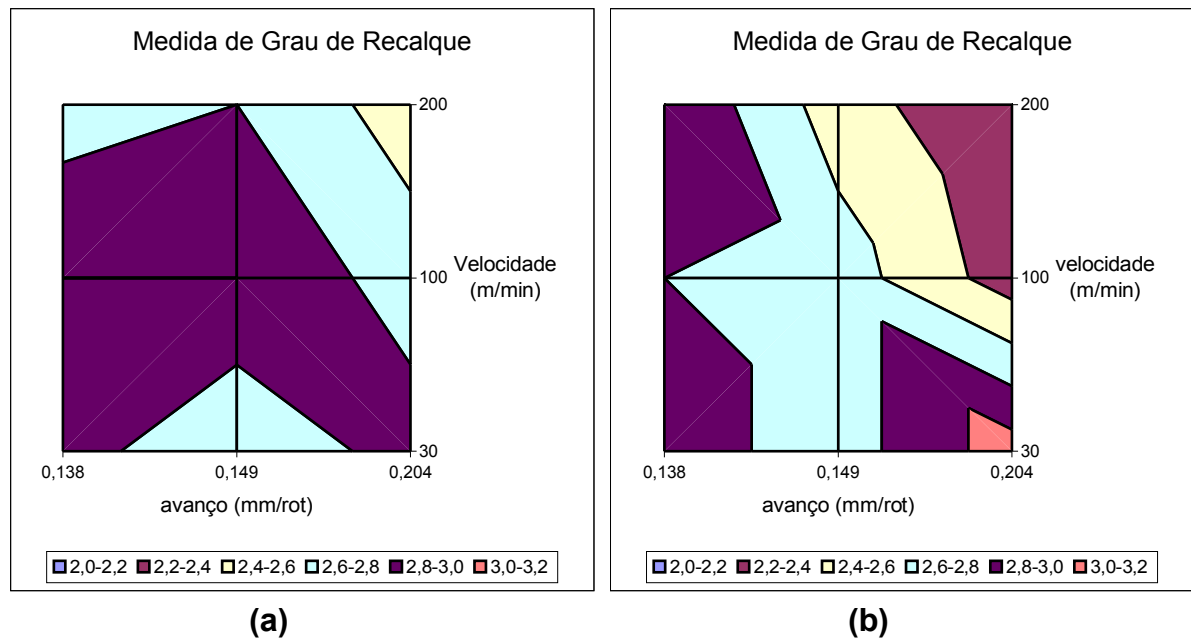


Figura 4.7: Gráfico bi-dimensional do grau de recalque em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de MQF, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

As figuras 4.8(a) e 4.8(b) mostram o efeito da velocidade de corte e do avanço no grau de recalque na usinagem com aplicação de fluido gotejado do aço ABNT 1045. Observa-se que valores de grau de recalque entre 2,8 e 3,0 predominam no corte com ferramenta sem revestimento e que os menores valores entre 2,4 e 2,6 aparecem para uma velocidade 200 m/min e avanço 0,204 mm/rot conforme mostra a figura 4.8(a). A figura 4.8(b) nos mostra que a influência do revestimento e da velocidade é mais significativa, pois os valores do grau de recalque sofreram uma variação maior com valores mínimos entre 2,2 e 2,4 para velocidade 200 m/min e avanço 0,204 mm/rot e valores máximos para velocidade 30 m/min e avanço 0,204 mm/rot. Verifica-se ainda que a usinagem com aplicação de MQF e ferramenta sem revestimento apresentou valores menores do grau de recalque para velocidades acima de 30 m/min e todos os avanços verificados. A utilização de ferramentas revestidas e altos avanços provocou variações extremas no grau de recalque conforme a velocidade aumentava o grau de recalque diminuía reduzindo as espessuras adquiridas e propiciando a formação de cavacos longos, conforme nos mostram as figuras 4.6(b), 4.7(b) e 4.8(b).

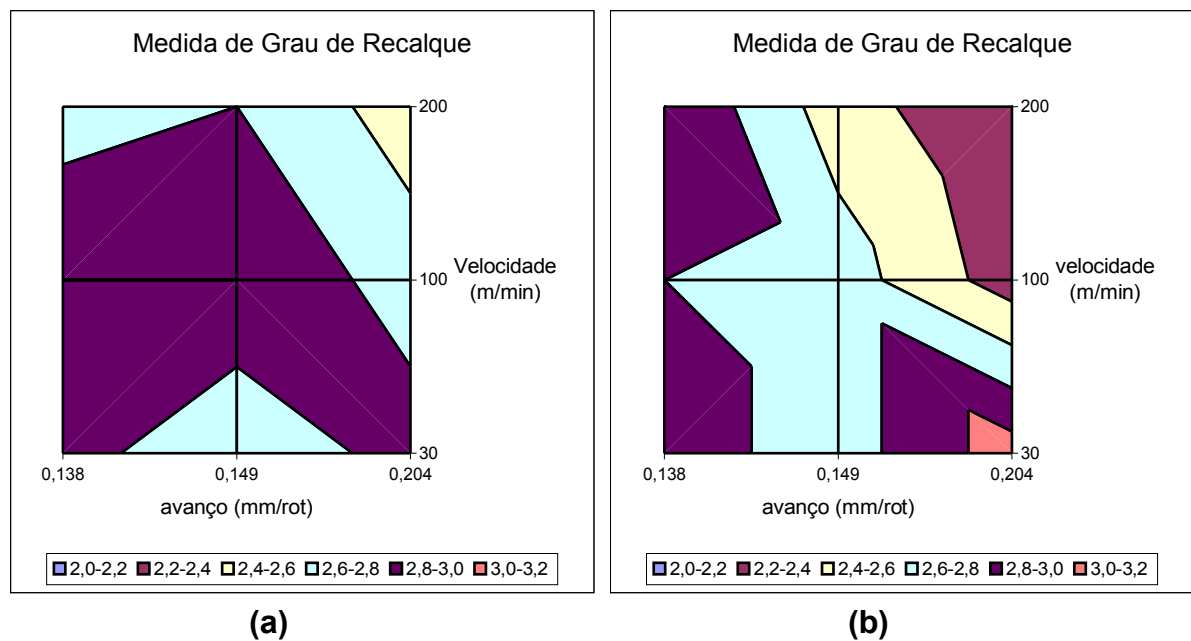


Figura 4.8: Gráfico bi-dimensional do grau de recalque em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de fluido gotejado, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

Os gráficos das figuras 4.9(a) e 4.9(b) mostram o efeito da velocidade de corte e do avanço na espessura do cavaco formado na usinagem a seco do ferro fundido nodular. A figura 4.9(a) mostra uma redução das espessuras dos cavacos encontrados entre 0,2 mm e 0,3 mm apenas para o avanço 0,149 mm/rot e velocidades próximas de 100 m/min o que gera menos deformação e uma tendência à continuidade e formas tubulares. Embora os cavacos apresentados nestes casos fossem um pouco maiores que os demais, ainda sim continuaram parcialmente contínuos e curtos.

Para ferramenta sem revestimento, a espessura do cavaco é afetada apenas para a menor velocidade de corte. Para ferramentas revestidas, a espessura do cavaco é maior para o maior avanço. Também neste caso, a velocidade de corte quase não tem efeito. Isto provavelmente se deve a característica frágil do material da peça que provavelmente não é afetada pelo aumento de temperatura provocado pelo aumento da velocidade de corte.

As figuras 4.10 e 4.11 mostram respectivamente o efeito do fluido aplicado por MQF e gotejamento na usinagem do ferro fundido nodular. Para todos os casos,

quase não há efeito da velocidade de corte e a forma de aplicação de fluido e o revestimento não influencia.

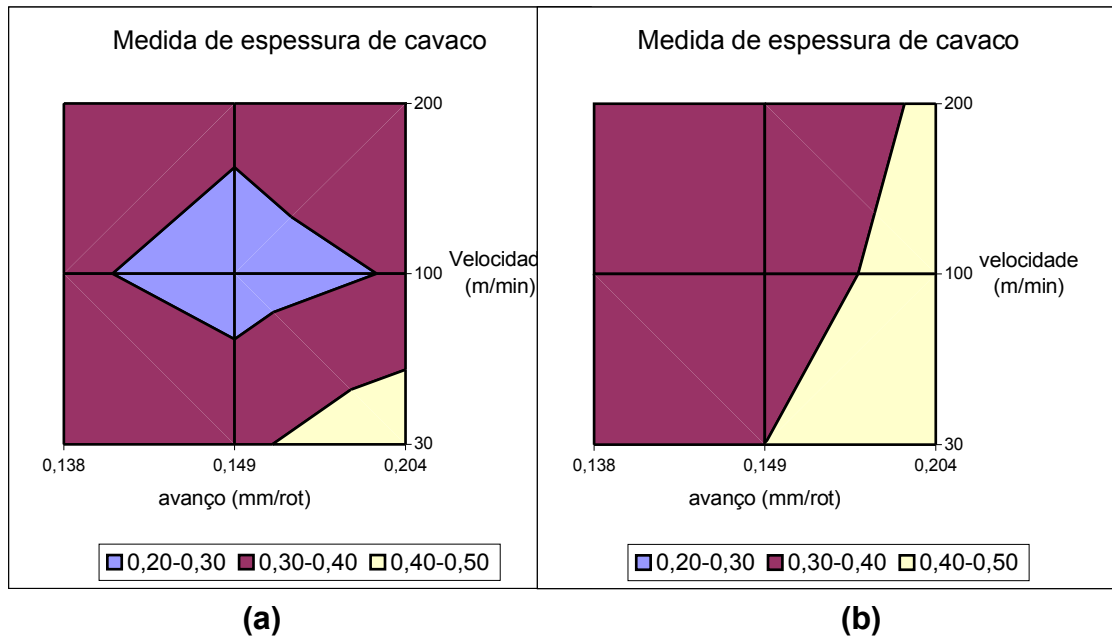


Figura 4.9: Gráfico bi-dimensional da espessura do cavaco em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem a seco, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

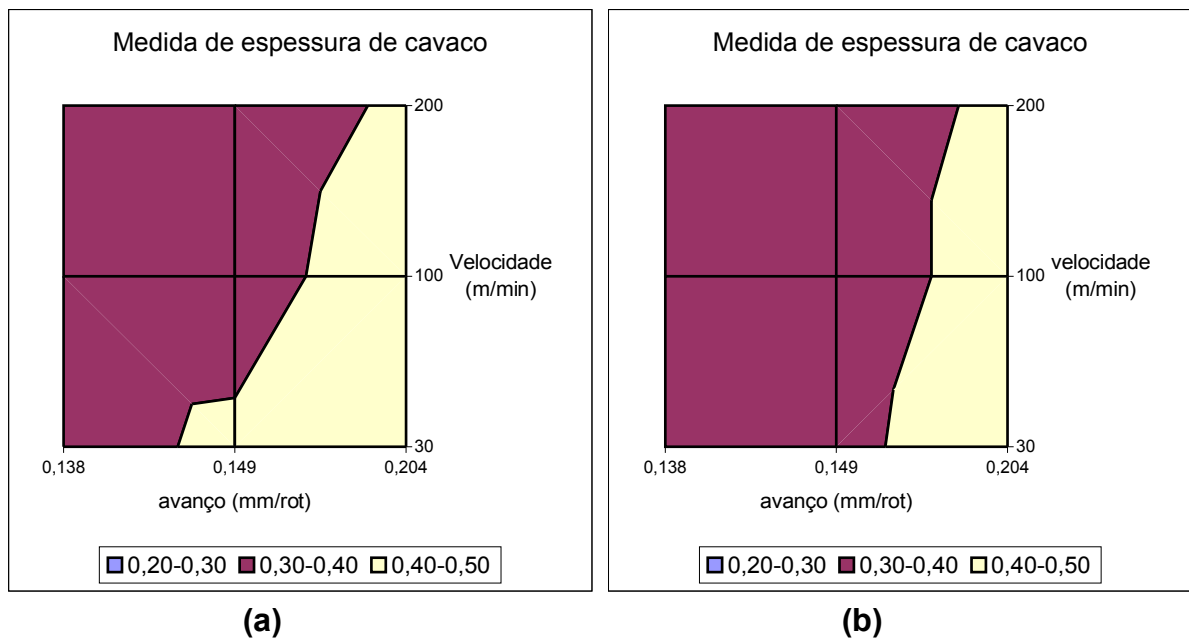


Figura 4.10. Gráfico bi-dimensional da espessura do cavaco em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de MQF, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

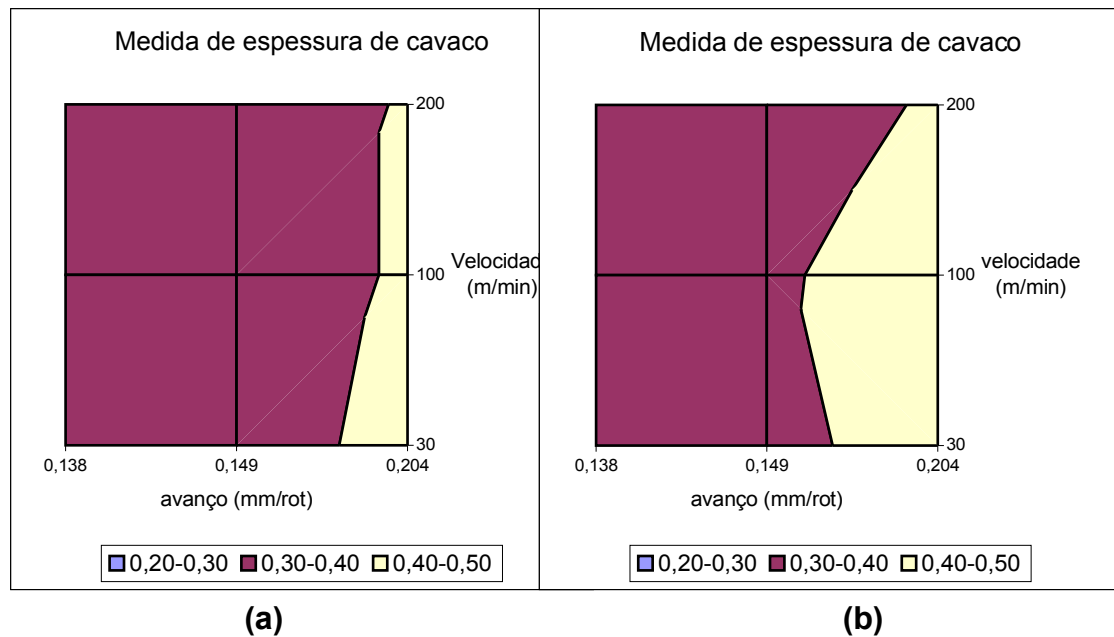


Figura 4.11: Gráfico bi-dimensional da espessura do cavaco em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de fluido gotejado, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

As figuras 4.12 a 4.14 mostram o comportamento do grau de recalque com a velocidade de corte e com o avanço na usinagem do ferro fundido nodular a seco. Conforme esperado após os resultados anteriores, não existe muita influência entre os testes com aplicação de fluido ou com ferramenta revestida. Apenas na condição à seco e com ferramenta sem revestimento, percebe-se a influência marcante do avanço, diminuindo o grau de recalque.

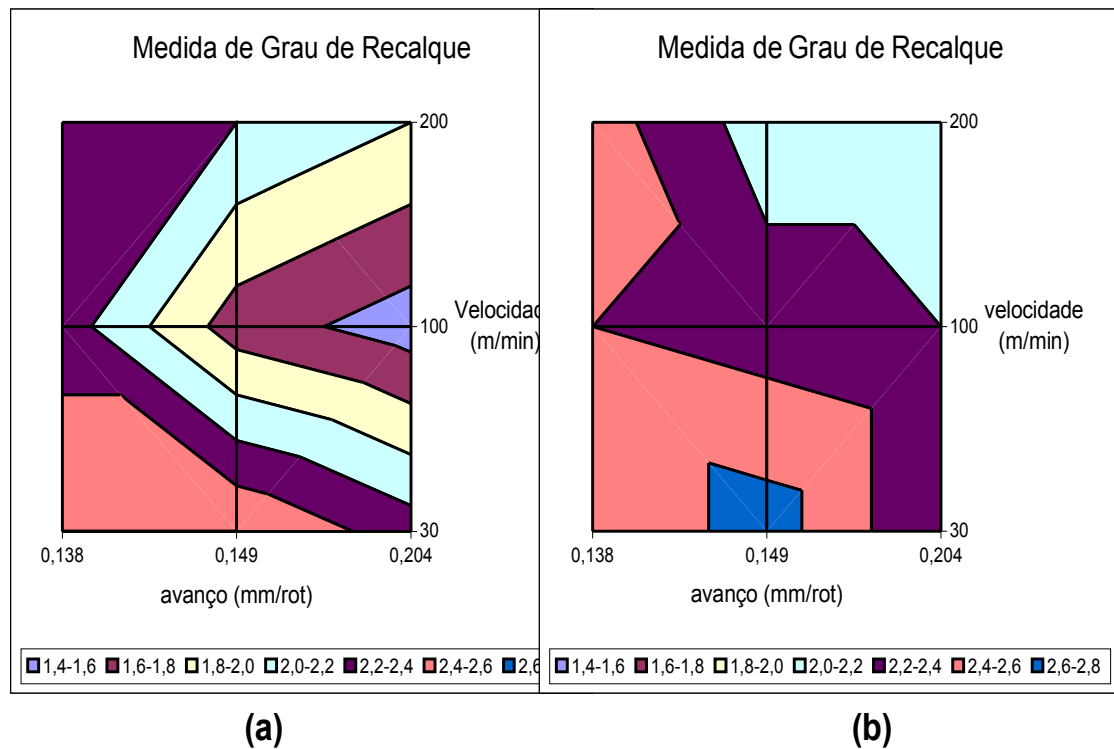


Figura 4.12: Gráfico bi-dimensional do grau de recalque em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem a seco, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

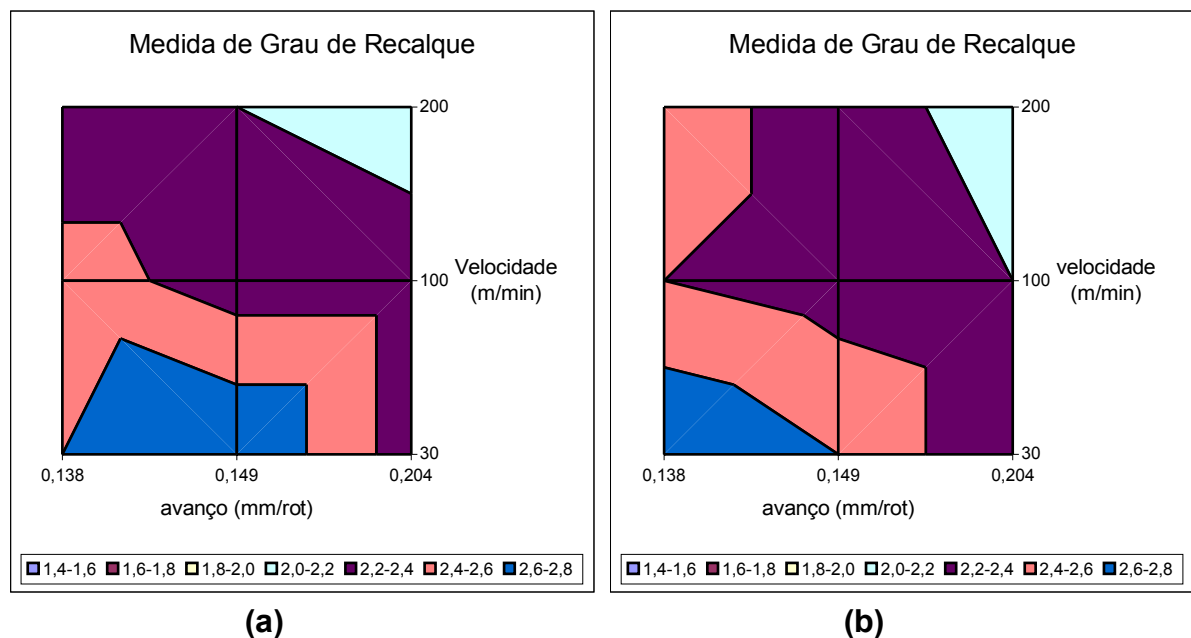


Figura 4.13: Gráfico bi-dimensional do grau de recalque em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de MQF, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

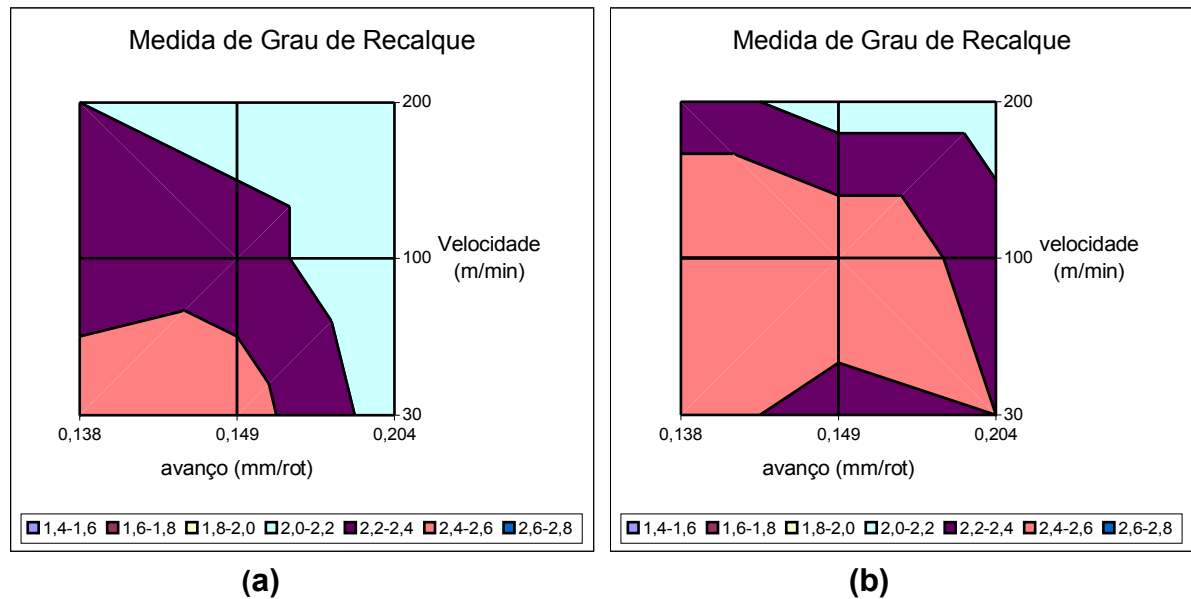


Figura 4.14: Gráfico bi-dimensional da espessura do cavaco em função da velocidade de corte e do avanço na usinagem com aplicação de fluido gotejado, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

4.3.1 INFLUÊNCIA NA FORÇA DE CORTE

Os gráficos 4.15 a 4.17 mostram que tanto o revestimento quanto o fluido reduziram a força de corte F_c para a usinagem do aço ABNT 1045.

Revestimento e fluido de corte afetam a interface cavaco ferramenta e portanto influenciam na resistência à movimentação do cavaco e força de corte.

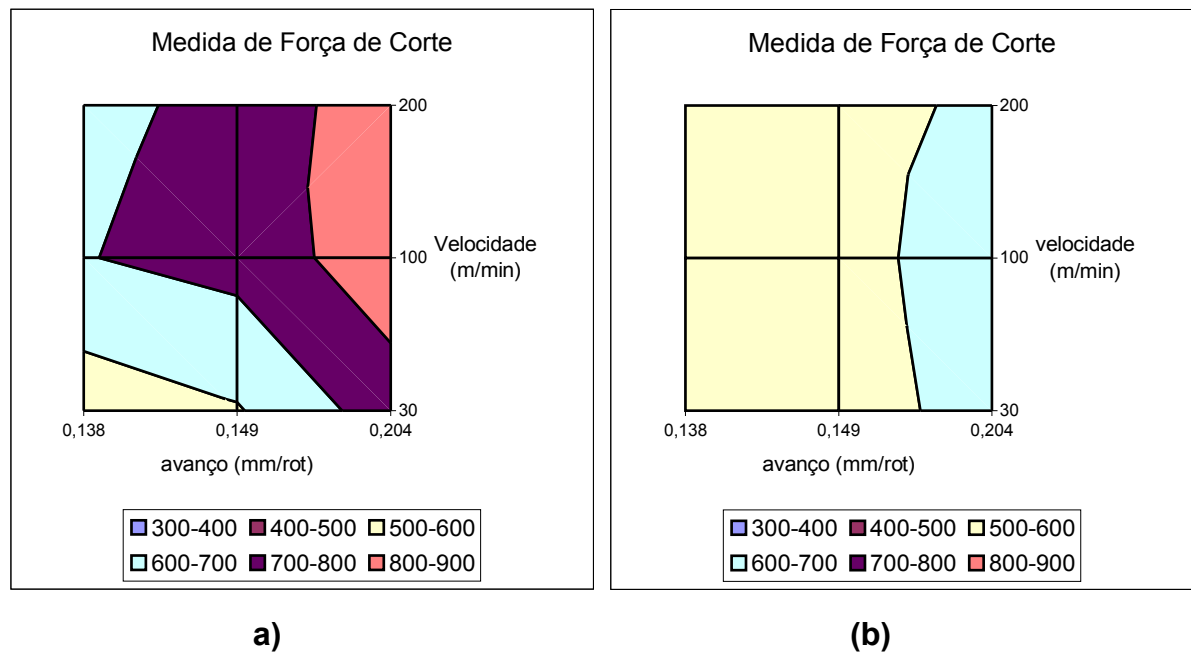


Figura 4.15: Efeito da velocidade e do avanço na força de corte na usinagem a seco, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

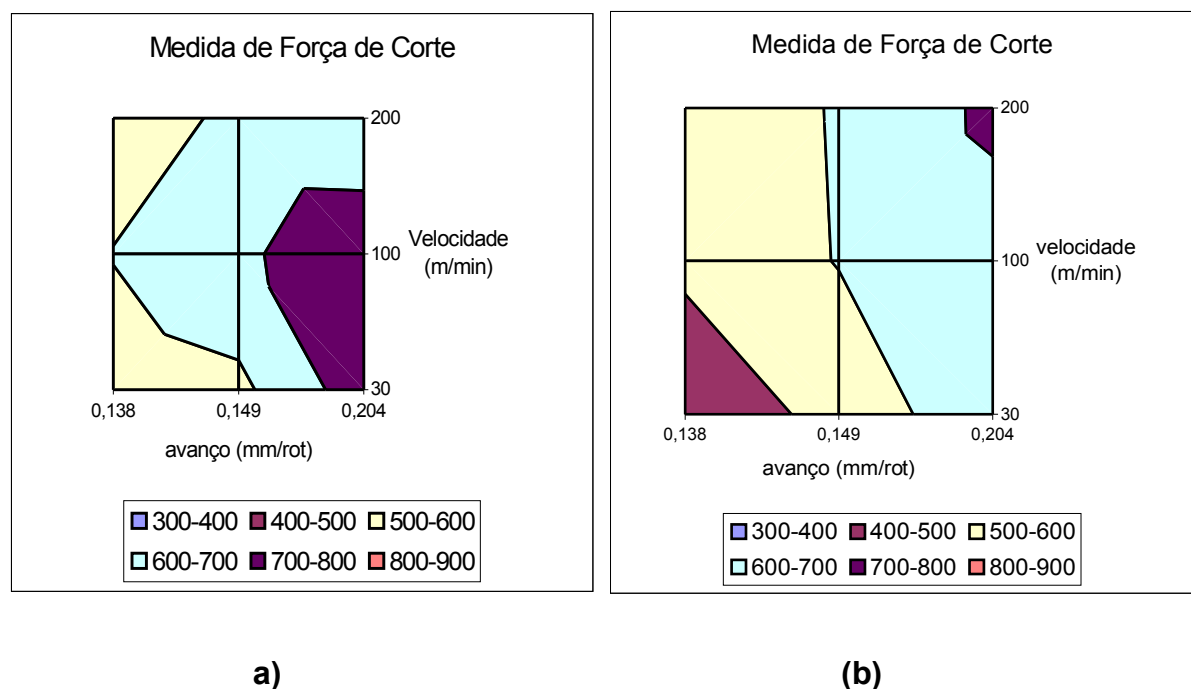


Figura 4.16: Efeito da velocidade e do avanço em função da força de corte na usinagem com aplicação de MQF, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

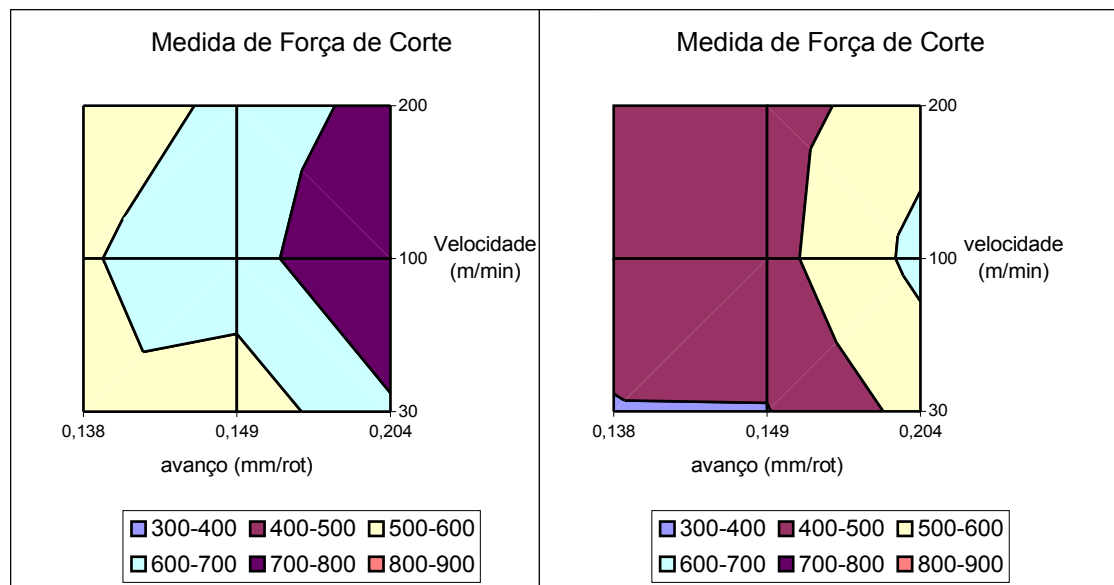


Figura 4.17: Efeito da velocidade e do avanço em função da força de corte na usinagem com aplicação de fluido gotejado, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

Nas figuras 4.18(a) e 4.18(b), são apresentados os gráficos de superfície que relacionam as medidas de força, velocidade de corte e avanço, na usinagem a seco do ferro fundido nodular. Nota-se na figura 4.18(a) que com o aumento dos avanços, houve um aumento sucessivo das forças de corte e para avanço 0,204 mm/rot e velocidades tendendo para um valor próximo de 100 m/min, nota-se um leve aumento das forças. A figura 4.18(b) mostra que na usinagem do ferro fundido nodular utilizando ferramenta com revestimento, nota-se uma característica particular onde se aumenta velocidades e avanços e as superfícies são bem homogêneas e semelhantes, o que nos leva a crer que realmente houve uma redução na área de contato cavaco ferramenta e que as forças se tornaram quase constantes.

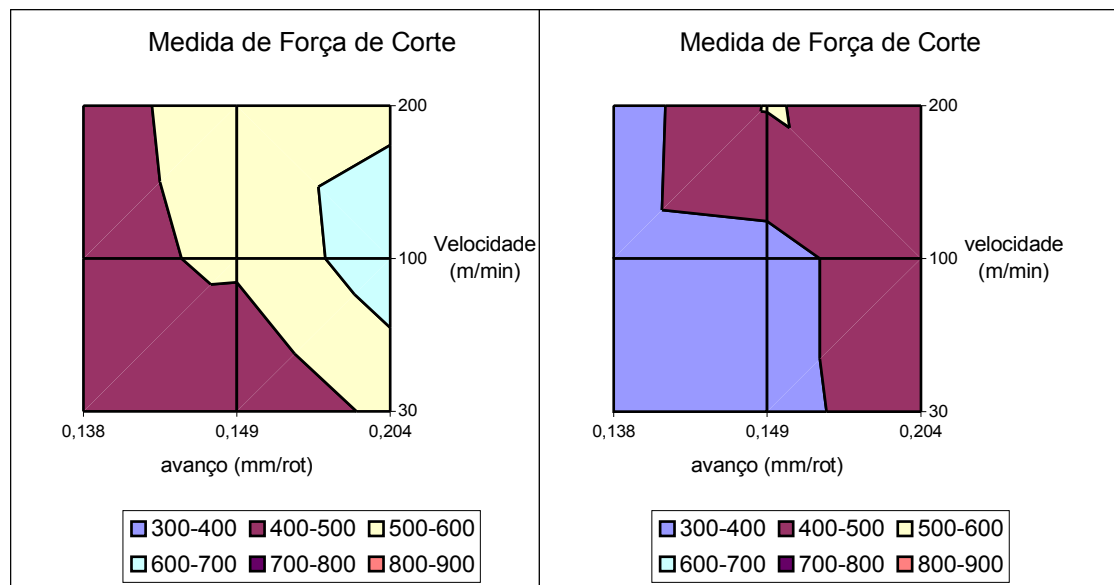


Figura 4.18: Efeito da velocidade e do avanço em função da força de corte na usinagem a seco, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

Nas figuras 4.19(a) e 4.19(b), são apresentados os gráficos de superfície que relacionam as medidas de força, velocidade de corte e avanço, na usinagem com aplicação de MQF do ferro fundido nodular. Nota-se que de um modo geral houve uma leve redução nas forças devido a aplicação de MQF e que a eficiência do revestimento sob condições críticas fez com que as forças não ultrapassassem 500N conforme mostra a figura 4.19(b).

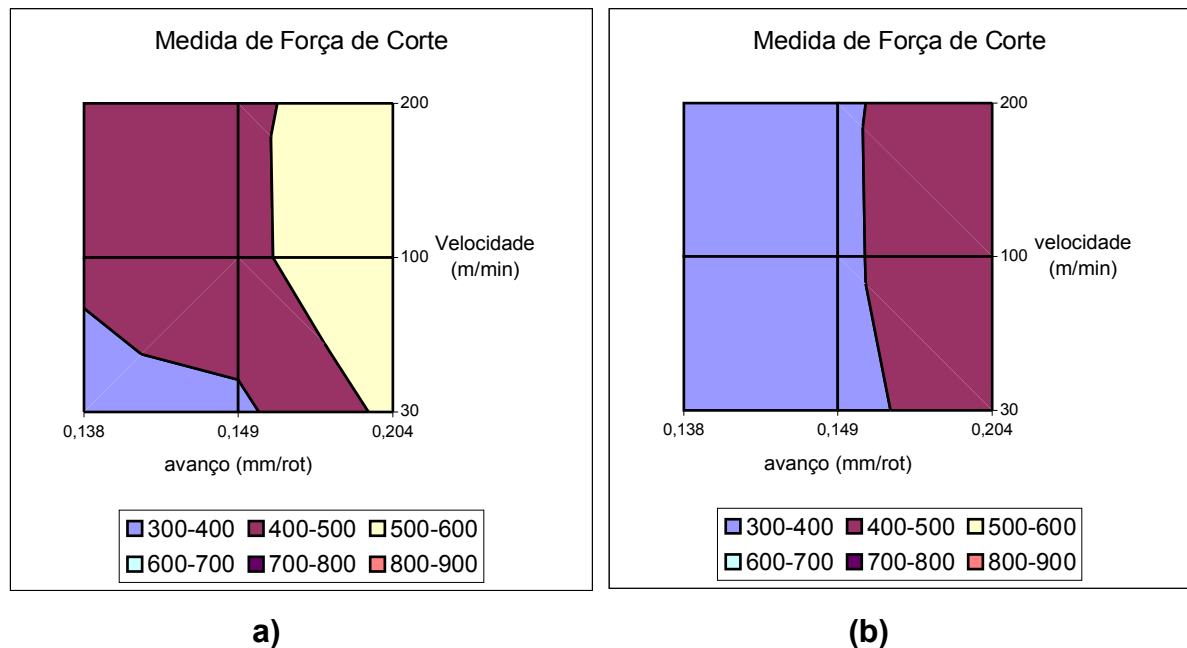


Figura 4.19. Efeito da velocidade e do avanço em função da força de corte na usinagem com aplicação de MQF, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

As figuras 4.20(a) e 4.20(b), apresentam os gráficos de superfície que relacionam as medidas de força, velocidade de corte e avanço, na usinagem com aplicação de fluido gotejado do ferro fundido nodular. Observa-se na figura 4.20(a) que mesmo com a aplicação de fluido gotejado a usinagem para avanço 0,204 mm/rot e velocidades próximas de 100 m/min apresentaram um aumento nos valores das forças de corte encontradas entre 600N e 700N semelhante à condição a seco apresentada na figura 4.18(a). O revestimento se mostrou eficaz na redução dos valores das forças de corte encontradas com um comportamento idêntico à condição com aplicação de MQF como nos mostra a figura 4.20(b). (Lucas et al, 2005), propõem que nas velocidades de corte entre 20m/min e 40 m/min e avanços entre 0,2 e 0,3 mm/rot, a formação de aresta postiça de corte foi observada na usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta revestida, no entanto não utilizamos avanços superiores a 0,204 mm/rot. Os cavacos também se mantiveram bem característicos do tipo parcialmente contínuos e formas variando entre espiral e tubular.

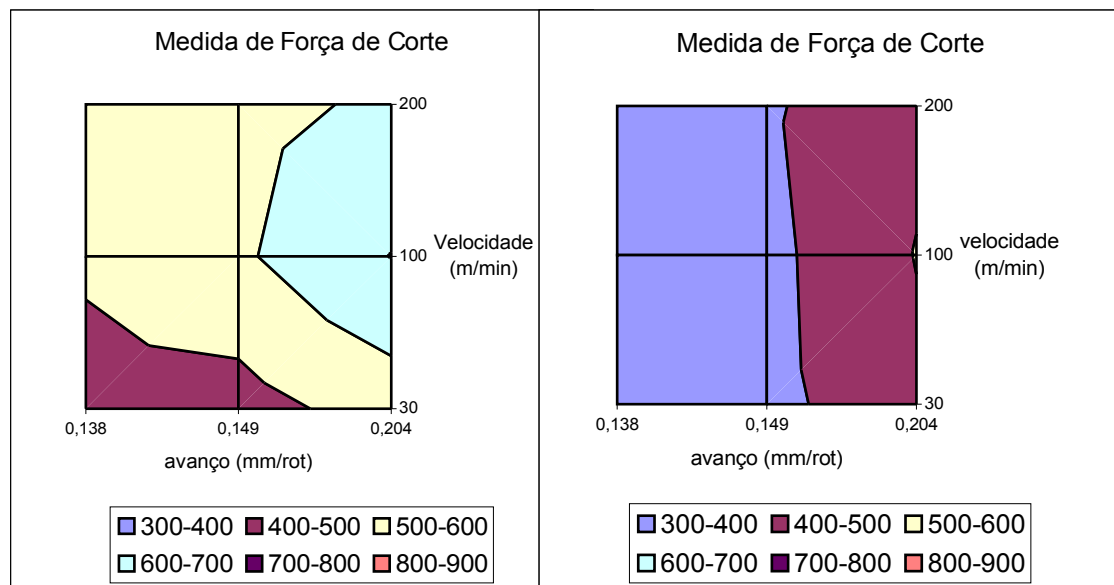


Figura 4.20: Efeito da velocidade e do avanço em função da força de corte na usinagem com aplicação de fluido gotejado, (a) sem revestimento, (b) com revestimento.

4.4 FORÇAS DE AVANÇO RESIDUAIS

Na figura 4.21 é apresentado o gráfico que relaciona a força de corte, com a espessura de corte, obtido na usinagem a seco do aço ABNT 1045 com a velocidade de corte $v_c = 150 \text{ mm/min}$, $a_p = 3 \text{ mm}$, $h = 1 \mu\text{m}$ à $h = 30 \mu\text{m}$, $\alpha_0 = 5^\circ$, $\gamma_0 = 0^\circ$ e ferramenta de aço-rápido. Neste ensaio a espessura do material foi variada de maneira crescente e observa-se uma linearidade no comportamento da curva encontrada para espessuras de material na faixa de $1 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$, para espessuras superiores a $20 \mu\text{m}$ a curva começa a variar entre 237N e 614N.

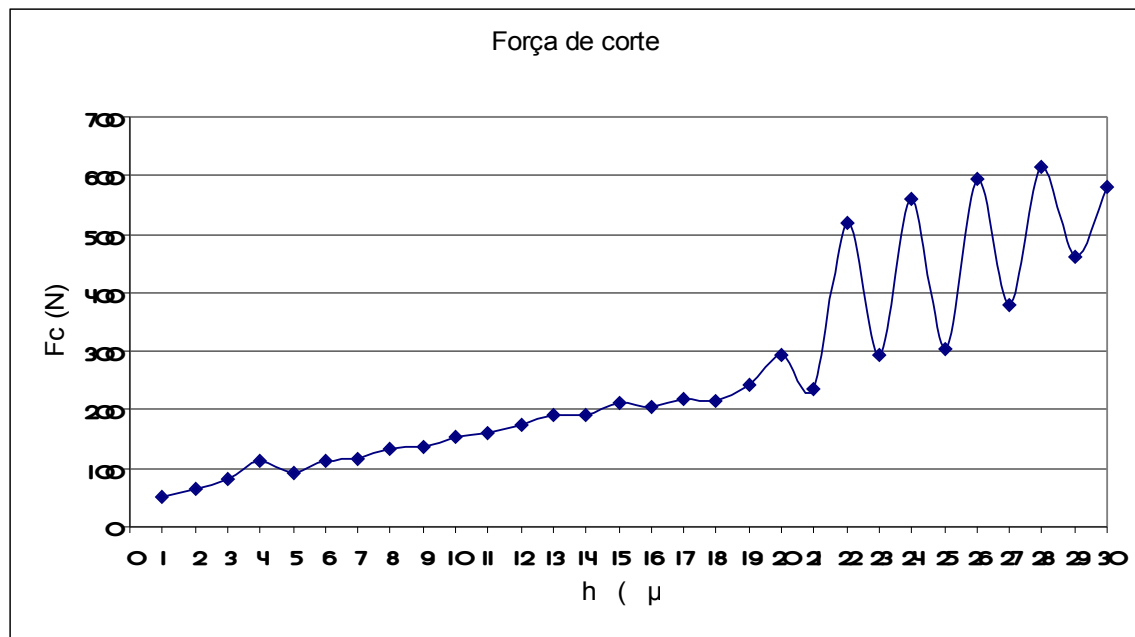


Figura 4.21: Força de corte em função da espessura do material (crescente).

A figura 4.22 mostra o gráfico que relaciona a força de corte com a espessura do material, obtido na usinagem do aço ABNT 1045 nas mesmas condições apresentadas na figura 4.22. Neste ensaio a espessura do material foi variada de maneira decrescente, e o comportamento linear da curva se manteve para espessuras menores, visto que para espessuras acima de 12μm as curva começou a variar entre 122N e 547N.

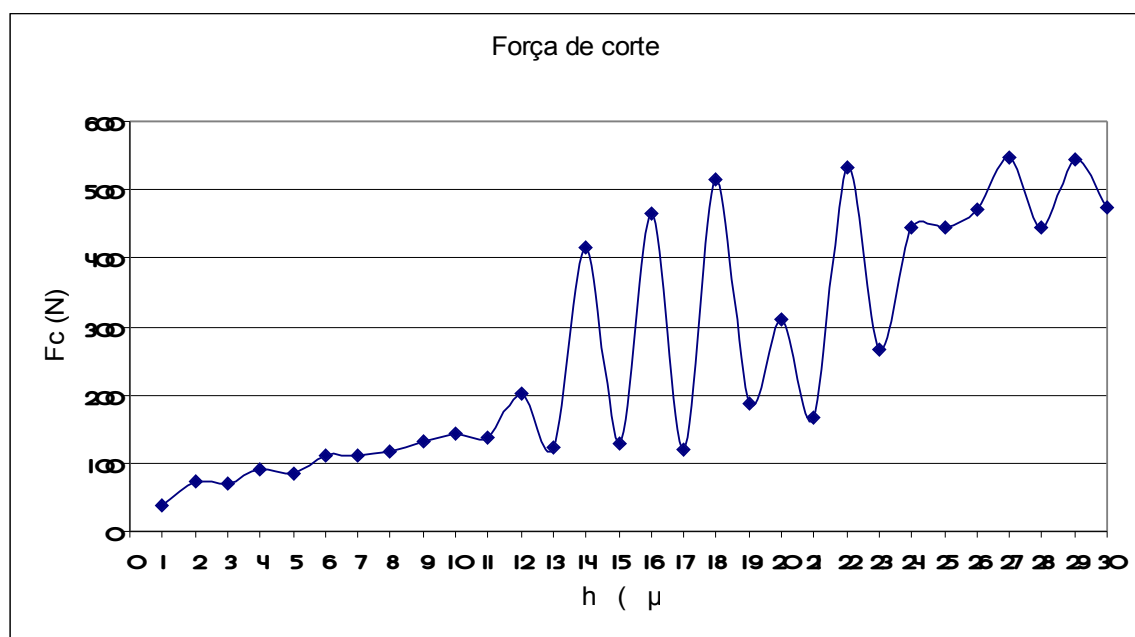


Figura 4.22: Força de corte em função da espessura do material (decrescente).

De acordo com o item 2.9, pode-se considerar uma deformação elástica durante o corte e isto significa que a ferramenta precisa penetrar em uma profundidade mínima dentro do material antes de começar a cortá-lo e a força envolvida neste intervalo é chamada força residual, calculada por meio de extrapolação de uma curva de força de corte para um h igual a zero. As figuras 4.23 e 4.24 mostram as curvas extrapoladas e as respectivas forças residuais para ensaios com espessura crescente e decrescente. Observa-se que no primeiro teste a força residual atingiu um valor próximo de 52N. No segundo teste ela obteve uma leve queda atingindo um valor próximo de 46N. (Da Silva e Wallbank), encontraram valores de forças residuais próximos de 32N, na usinagem do aço AISI 1040 de dureza 199Hv e velocidades superiores a 22 m/min.

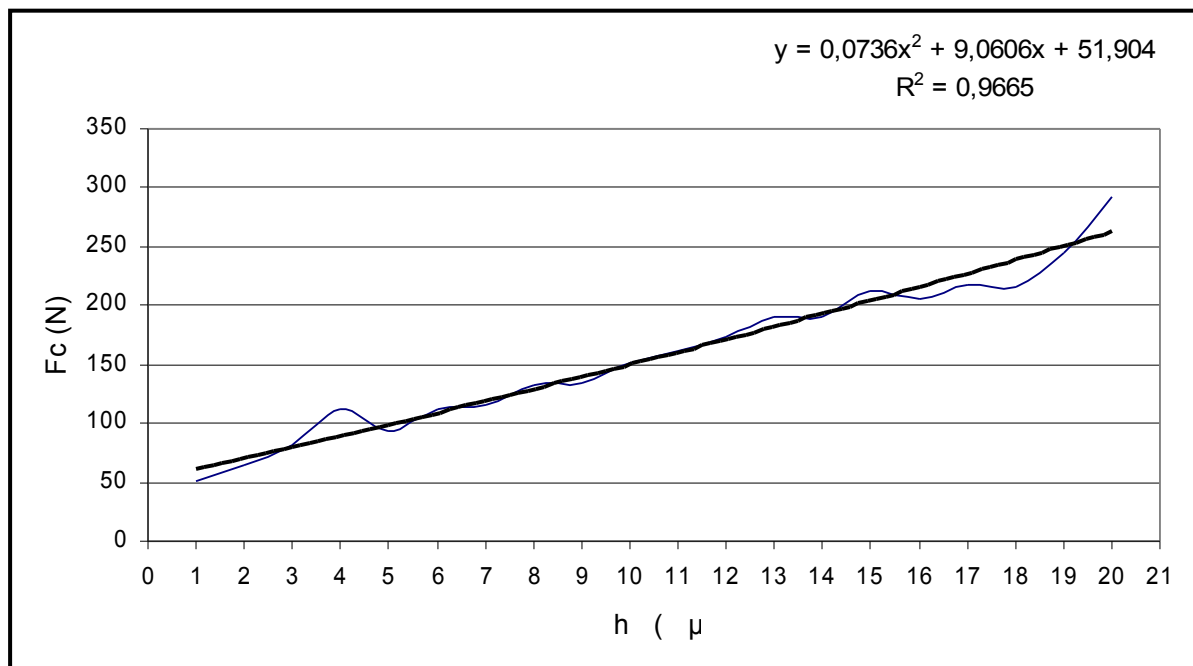


Figura 4.23: Força residual em função da espessura do material (crescente)

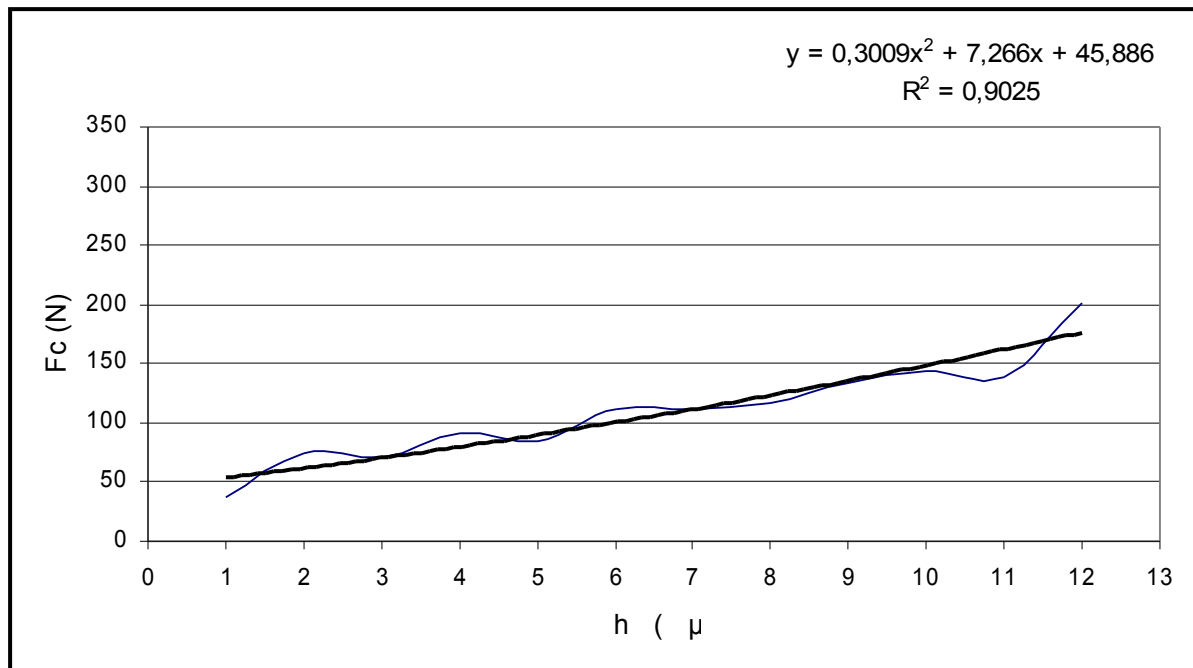


Figura 4.24: Força residual em função da espessura do material (decrecente)

As figuras 4.25 e 4.26, mostram o término da linearidade das curvas e suas diferenças com relação à espessura de corte. Nota-se que este fenômeno não é constante para ambos os testes, mesmo se tratando do mesmo material. Como já foi dito no item 2.9 a temperatura obtida na zona de fluxo e a alta taxa de deformação pode ter afetado o comportamento do material durante o corte, e não existe meios de testar o material sob tais condições, pois seu comportamento fundamental é desconhecido. Então a variação de forças após o fim da linearidade da curva pode ter ocorrido devido a propriedades estruturais do material como por exemplo tamanho dos grãos ou mesmo influenciadas pelo sistema máquina ferramenta. No entanto para afirmações mais precisas haveria a necessidade de se fazer uma micrografia tanto da superfície gerada após a usinagem, quanto do material arrancado, se fosse o caso. E não podemos descartar a hipótese de uma influência do raio de ponta, que pode ter sido alterado durante o processo de usinagem com o desgaste da ferramenta, visto que foi utilizada a mesma ferramenta para todos os testes e com estas medidas poderíamos analisar uma possível influência nesta variação de forças.

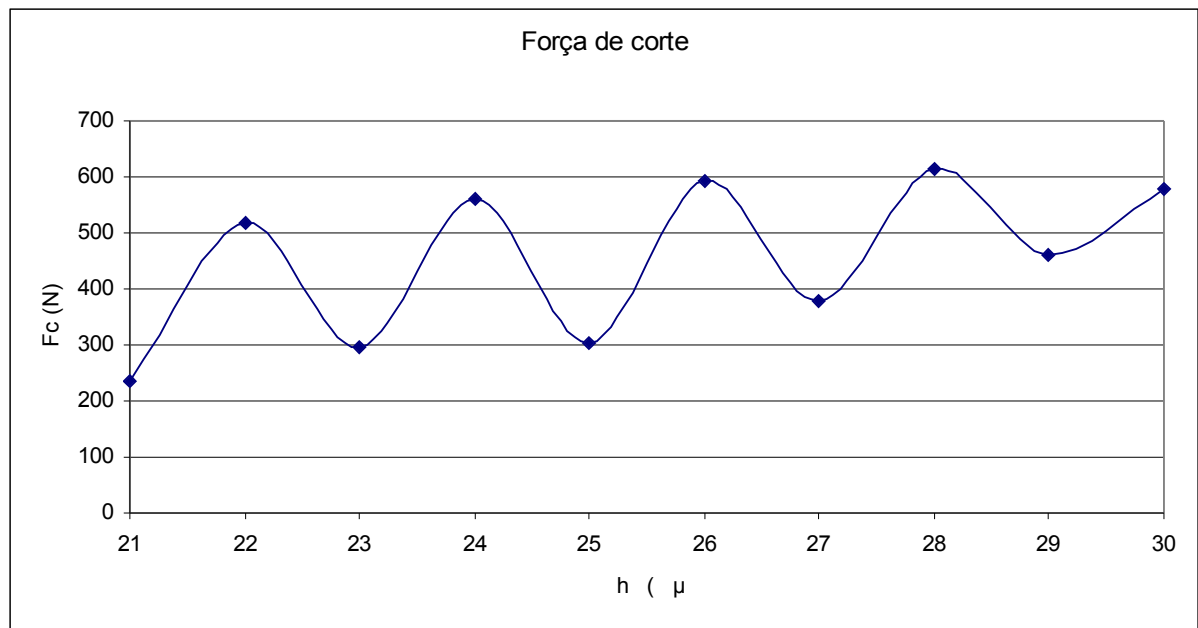


Figura 4.25: Força de corte em função da espessura do material (crescente)

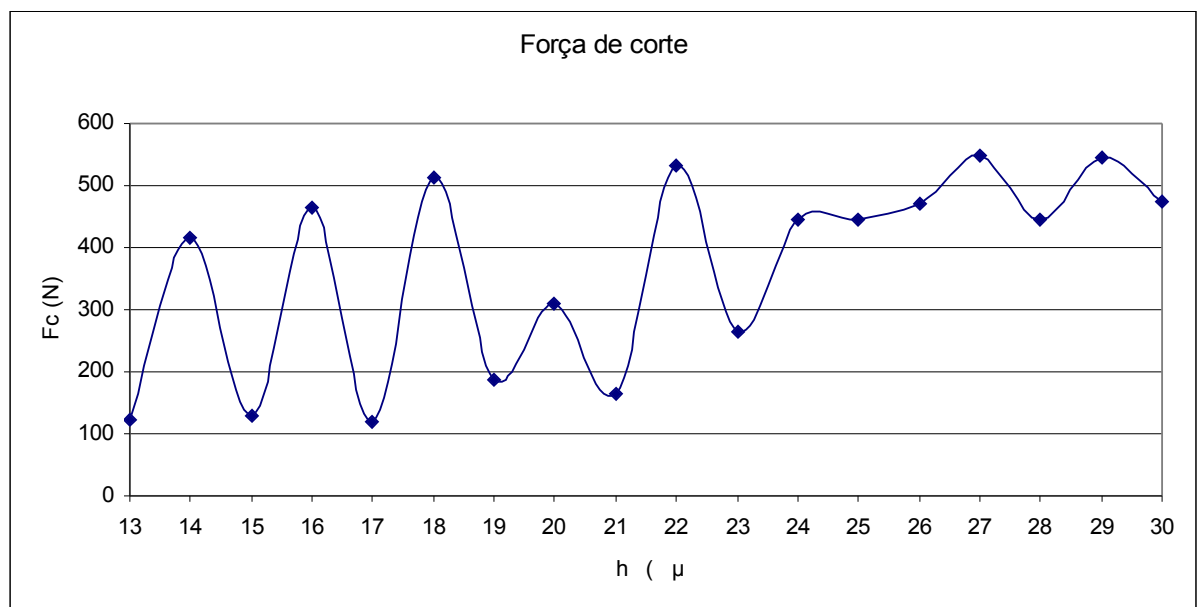


Figura 4.26: Força de corte em função da espessura do material (decrescente)

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Em função dos resultados experimentais obtidos, pra investigar a formação dos cavacos do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular, pode-se concluir que:

Em todos os testes sob as mesmas condições predominaram os cavacos helicoidal arruela longo para o aço ABNT 1045 e espiral cônico para o ferro fundido nodular.

O fluído de corte e ferramenta sem revestimento na usinagem do aço ABNT 1045 alterou em algumas situações os cavacos para espiral ou tubular curto.

Quando se utiliza ferramenta revestida na usinagem do aço ABNT 1045, com exceção de seis condições de corte, os cavacos são helicoidais, o que nos mostra que a forma do cavaco está relacionada com a interface cavaco ferramenta, região onde o fluído e o revestimento tem efeito.

Na usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta sem revestimento os cavacos se apresentaram mais curtos na forma espiral.

Foi observada uma grande quantidade de deformação plástica nos cavacos do aço ABNT 1045, com grafitas bastante alongadas e orientadas paralelas à zona de cisalhamento primária.

A alta deformação na estrutura do cavaco foi verificada através da distribuição da dureza, que no aço ABNT 1045 revelou valores na faixa de 310 – 400 HV no cavaco e 210 – 234 no material da peça e no ferro fundido nodular na faixa de 151 – 295 HV no cavaco e 142 – 250 no material da peça.

O aumento da dureza é significativamente maior nos cavacos de aço ABNT 1045 com relação ao material em bruto do que o aumento da dureza dos cavacos de ferro fundido nodular com relação ao material em bruto.

O avanço é determinante no aumento da espessura do cavaco do aço ABNT 1045, ou seja com o aumento do avanço temos o aumento da espessura. O aumento da velocidade significa uma diminuição da espessura dos cavacos.

Menores avanços predomina a produção de cavacos contínuos e longos.

O revestimento apresentou maior influência para usinagem do aço ABNT 1045 com pequenas velocidades e grandes avanços.

A aplicação de MQF reduziu os valores das espessuras dos cavacos. A influência do fluido é maior para baixas velocidades de corte e grandes avanços.

O grau de recalque é o parâmetro mais interessante para avaliar a usinabilidade do par ferramenta peça.

A usinagem com utilização de ferramenta revestida proporciona o aumento do grau de recalque.

Na usinagem do ferro fundido nodular para ferramentas sem revestimento, a espessura do cavaco é afetada apenas para velocidades de corte menores. Para usinagem com aplicação de fluido por MQF e gotejado, quase não há efeito da velocidade de corte e a forma de aplicação de fluido e o revestimento não influencia.

O revestimento e o fluido afetam a interface cavaco ferramenta e portanto influenciam na resistência à movimentação do cavaco e a força de corte.

O fluido mostrou-se eficaz na redução dos valores das forças de corte encontradas na usinagem do ferro fundido nodular.

A força residual para o aço ABNT 1045 variou entre 46N e 52N.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fazer um tratamento estatístico nos resultados obtidos dos experimentos para uma maior exploração dos mesmos e correlações entre os parâmetros utilizados.

Alterar a metodologia de medição da microdureza para se verificar efetividade dos parâmetros de corte sobre esta propriedade.

Investigar outras funções dos fluídos na formação dos cavacos.

Investigar o desempenho e influência de revestimentos superficiais de ferramentas de metal duro.

Verificar as forças residuais de outros materiais, fazendo ensaios com repetição para uma mesma espessura de material, micrografia da superfície usinada e medição do arredondamento do raio de ponta da ferramenta.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albrecht, P. – “New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process – Part 1. – november 1960.

Amini, E. “Photoelastic Analysis of Stress and Forces in Steady Cutting”, journal of Strain Analysis, vol 3, 1968.

Barrow, G.; Graham, W.; Kurimoto, T. e Leong, Y. F. “ Determination of Rake Face Stress Distribution in Orthogonal Machining”, mach – 1982.

Bickel, E. “Les annals du CIRP. Zurique, 3: 90-1. 1954.

Boothroyd, G. “Fundamental of metals machining and machine tools” Mc Graw-Hill – 1981.

Borissow, B. J. “temperature und Vibration beim Zerspanen von Metallen”, moscou – 1957.

Cook, N. H., “Chip formation in Machining Titanium” , Massachussets – 31 março 1953.

Cook, N. H., Finnie, I., and Shaw, M. C. “Discontinuous chip formation”, feb. 1954.

Da Silva, M. B., Tese de doutorado em Mechanical Engineering. University of Warwick, WARWICK, Inglaterra. Lubrication in Metal Cutting under Built-up Edge Conditions, 1998.

Da Silva, M. B.; Wallbank, J.; “Contact of the Workpiece Material with the Tool Flank in Machining” International Manufacturing Centre, Department of Engineering, University of Warwick, Coventry CV47AL, UK.

Din “Krafte und Leistungen”, DIN 6584 (ENT WRF), Berlin, Buethvertrieb Gmbh, oct, 1963.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., “Tecnologia da Usinagem dos metais”, Editora Art Liber, São Paulo, 2000.

E Silva, F.C.S. Diagnóstico do Processo de Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 a partir do Estudo da Formação do Cavaco, 2007, 66 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Ferraresi, D., 1977, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.

Iso “Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools”, ISO 3685, 1977.

Kato, S.; Yamagusshi, K. e Yamada, M. “Stress Distribuition Between Tool and chip in Machining”, Trans ASME, J. Eng. Industry, vol. 94 – may, 1972.

Komanduri, R. and Von turkovich, B. F. “New observations on the Mechanisns of chip Formation when Machining Titanium Alloys”, Wear, vol. 69, 1981.

Landberg, P. “Durch die Spanbildung verursachte Schwingungen” Microtecnic. Zurique, outubro de 1948.

Le maire, J. C., and BACKOFEN, W. A. “Adiabátic Instability in Orthogonal Cutting of Steel”, Metal trans, vol 3, 1972.

Lucas, E. O.; Weingaertner, W. L. e Bernardini, P. A. N. “Como o cavaco se forma no torneamento do fofo nodular ferrítico” UFSC , Joinville , abril – 2005.

Machado, A. R. e Da silva, M.B.,2004, “Usinagem dos Metais”, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Editora UFU, Universidade Federal de Uberlândia, pp.266.

Machado, A. R.; Gianini, W. L.; Bohes, L. “Verificação Experimental do comportamento das forças de corte e de avanço no torneamento do ferro fundido ABNT FC-250 utilizando-se pastilhas de metal duro, cerâmica oxida e cerâmica não-óxida” VII CBCIMAT, UFSC, Florianópolis SC, dez, 1996, pp. 155-59.

Machado, A. R.; Gonçalves, R.A.; Gianini, W. L.”Verificação experimental do comportamento das forças de corte e de avanço no torneamento dos aços ABNT 1020, ABNT 1045 e alumínio comercial” IX COBEM, UFSC, Florianópolis SC, dez., 1987, pp. 1029-1033.

Merchant, M. E. “Mechanisms of the Metal Cutting Process. I: Orthogonal Cutting and Type 2 Chip”, J. Applied Physics, vol. 16, nº 5, may, 1954, pp. 267 – 275.

Meyer, K. F. “Der Einfluss der Werkzeuggeometrie und des Werkstoffes auf die Vorschub – und Ruckkraft beim Drehe”. Industrie Anzeiger. Essen, 45, junho, 1964.

Recht, R. F. “Catastrophic Thermoplastic Shear” , Journal Applied Mechanics, june 1964.

Reis, A. M. ‘influência do ângulo de Posição secundário da ferramenta, Raio de Ponta e Lubrificação na Usinagem em Presença de Aresta Postiça de Corte” Dissertação de mestrado em engenharia mecânica – UFU – 2000.

Schwerd, F., Spanend Werkzeugmaschinen. Berlin – 1956.

Shaw, M. C.; Dirk, S. O.; Smith, P. A.; Cook, N. H.; Loewen, E. G. and Yang, C. T. ”Machining Titanium”, Massachussets Institute of Technology, 1954.

Shaw, M.C.: Metal Cutting Principles. 1ª ed. New York: Oxford University Press, 1984.

Sibel, E. Handbusch der Werkstoffprufung, Berlin – 1955.

Smith, G. T. “ Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology”, IFS Publications, 1989, ISBN 1-85423-022-6.

Trent, E. M., 1984, “Metal Cutting”, 2nd Edition. Butterworths, London, 1991.

Trent, E. M. “Metal Cutting and the Tribology of Seizure: II – Movement of Work Material over the Tool in Metal Cutting”, Wear, vol. 128 – 1988.

Usui, E. Takeiama, H. “ A photoelastic Analysis of machining Stresses”, trans ASME, J. Eng. Industry, nov, 1960.

Vierregge, G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe – 1959.

Zorev, N.N. “Interrelationship Between Shear Processes Occuring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting”, USA, sept, 1963.

Wallbank, J. – “Flow at the Cutting Edge and the Generation of New Surfaces During Metal Cutting” – PhD Thesis, University of Birmingham, 1978.