

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FELLIPE BIAZI DE NOVAES
RAFAEL AGRIZZI DE SOUZA**

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DO CAVACO NO
TORNEAMENTO DO ALUMÍNIO UTILIZANDO CÂMERA DE
ALTA VELOCIDADE**

**VITÓRIA
2009**

FELLIPE BIAZI DE NOVAES
RAFAEL AGRIZZI DE SOUZA

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DO CAVACO NO
TORNEAMENTO DO ALUMÍNIO UTILIZANDO CÂMERA DE
ALTA VELOCIDADE**

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito parcial para obtenção do
Título de Engenheiro Mecânico.
Orientador: Prof. Flávio José da Silva

VITÓRIA
2009

FELLIPE BIAZI DE NOVAES
RAFAEL AGRIZZI DE SOUZA

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DO CAVACO NO
TORNEAMENTO DO ALUMÍNIO UTILIZANDO CÂMERA DE
ALTA VELOCIDADE**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em ____ de dezembro de 2009

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Flávio José da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Temístocles de Sousa Luz
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Valter Luiz dos Santos Cordeiro
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico este trabalho a meus pais (Ronaldo e Darlene) por todo amor, carinho e educação que me deram. Ao meu irmão (Matheus) que é muito mais que um irmão, é meu irmão e amigo. Aos professores que com toda a paciência e competência compartilharam seus conhecimentos. Aos amigos e amigas, que com certeza foram colocados em minha vida por Deus.

Fellipe Biazzi de Novaes

Dedico de forma especial este trabalho aos meus pais (Sebastião e Carme), a minha irmã (Karina) por sempre estarem presentes e acreditarem em mim. A Tatiana por todo seu amor e companheirismo. E a todos os professores e funcionários que contribuíram nessa caminhada.

Rafael Agrizzi de Souza

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus que nos deu força para transpor os obstáculos encontrados e chegar até aqui.

Aos pais pelo apoio, ajuda e amor durante o projeto, caminhada estudantil e por toda a vida.

Aos amigos e amigas que são como uma família em quem encontramos também palavras de conforto, carinho e de motivação.

Ao professor Flávio José da Silva pela confiança, apoio, incentivo e pela dedicação de parte do seu tempo para nos ajudar a realizar este projeto.

Ao técnico do Laboratório de Tecnologia Mecânica, Luiz, que foi fundamental para a realização do projeto, e por estar sempre disposto a ajudar sempre que precisávamos. E ao técnico do Laboratório de Vídeo, Geraldo, por auxiliar na edição dos vídeos e na determinação da lente necessária para os ensaios.

Aos professores do Departamento de Comunicação Social da UFES, Cleber Carminatti por disponibilizar o auxílio do Departamento com recursos necessários para realização dos ensaios. Ao professor David Protti por disponibilizar a lente utilizada na câmera de alta velocidade.

Ao amigo monitor Luis Rafael, no apoio no ensaio desenvolvido no Laboratório de Materiais; aos amigos monitores Alex e Izaias, Laboratório de Vídeo e Laboratório de Fotografia, respectivamente, por disponibilizarem recursos que nos ajudaram a desenvolver este projeto.

Enfim, por todos aqueles que passaram nas nossas vidas durante esses anos.

"É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer."

Aristóteles

RESUMO

Este trabalho busca estudar o processo de formação do cavaco do alumínio, através do processo de torneamento, visando obedecer às premissas e considerações do corte ortogonal. Para isso, a peça utilizada no ensaio foi um eixo escalonado fabricado de forma a atender as condições de corte ortogonal e dessa forma a formação do cavaco pudesse ser considerada como um fenômeno bidimensional. A operação foi realizada sem fluido de corte, variando o avanço e ângulo de saída da ferramenta, e assim, permitindo estudar a influência desses parâmetros no grau de recalque, ângulo de cisalhamento, e outros fatores que fornecem boa representação da quantidade de deformação que ocorre na zona de cisalhamento primária. Além disso, os ensaios foram realizados com auxílio de uma câmera de alta velocidade, que filmou o corte ortogonal, objetivando captar o comportamento do raio de curvatura do cavaco, e relacioná-lo com a característica geométrica do cavaco, além de mensurar a influência do avanço e do ângulo de saída da ferramenta nesse comportamento. Para a avaliação do grau de recalque e do ângulo de cisalhamento os cavacos formados foram analisados pela medição da espessura com auxílio de paquímetro digital, e a medição do raio de curvatura foi realizada com auxílio de software de análise de imagem.

Palavras chave: Corte Ortogonal, Raio de Curvatura do Cavaco, Deformação Cisalhante, Torneamento do Alumínio.

ABSTRACT

This paper explores the process of formation of aluminum chip through the process of turning, in order to comply with the assumptions and considerations of orthogonal cutting. For this, the work piece used in the test was a stepped shaft manufactured to meet the conditions for orthogonal cutting and thus the formation of the chip could be considered as a bi-dimensional phenomenon. The operation was performed without cutting fluid, and varying the feed and rake angle, and thus, allowing to study the influence of these parameters on the ratio of the undeformed chip thickness to the deformed chip thickness, shear plane angle, and other factors that provide good representation of the amount of deformation that occurs the primary shear zone. In addition, tests were carried out with the aid of a high speed camera, which filmed the orthogonal cutting, aiming to capture the behavior of the radius of curvature of the chip, and relate it to the geometric feature of the chip and to measure the influence of feed and rake angle in this behavior. To assess the ratio of the undeformed chip thickness to the deformed chip thickness and the shear plane angle, the chips formed were analyzed by measuring the thickness with the aid of digital caliper, and measuring the radius was performed using software image analysis.

Keywords: Orthogonal Cutting, Radius of Curvature of the Chip, Shear Strain, Turning of Aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de Torneamento	14
Figura 2 - Velocidades e Direção dos movimentos efetivos de corte, de avanço e efetivo no torneamento.....	15
Figura 3 - Torneamento Cilíndrico Externo	18
Figura 4 - Torneamento Cilíndrico Interno.....	18
Figura 5 - Sangramento Axial.....	18
Figura 6 - Torneamento Cônico Externo	19
Figura 7 - Torneamento Cônico Interno	19
Figura 8 - Torneamento de Faceamento	20
Figura 9 - Sangramento Radial.....	20
Figura 10 - Perfilamento Radial	20
Figura 11 - Perfilamento Axial	21
Figura 12 - Torneamento Curvilíneo.....	21
Figura 13 - Esquema mostrando zonas de cisalhamento	22
Figura 14 - Exemplos de Corte Ortogonal.....	23
Figura 15 - O Corte Ortogonal.....	24
Figura 16 - Diagrama da Cunha Cortante	25
Figura 17 - Processo Cíclico de Formação do Cavaco	26
Figura 18 - Fluxo de cavaco.....	27
Figura 19 - O modelo de deformação por cisalhamento	28
Figura 20 - Deformação por cisalhamento versus ângulo de cisalhamento para três ângulos de saída diferentes	30
Figura 21 - Fatores que Influenciam na Forma do Cavaco	31
Figura 22 - Cavacos contínuos.....	32
Figura 23 - Cavacos descontínuos.....	34
Figura 24 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais.....	36
Figura 25 - Influência do ângulo de saída sobre a forma do cavaco na usinagem de aço	38
Figura 26 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.....	38
Figura 27 - Método da redução periódica do avanço	39
Figura 28 - Método da injeção de fluido de corte a alta pressão.....	40
Figura 29 - Quebra-Cavaco apresentado na superfície de saída.....	40
Figura 30 - Esquema do Ensaio	46
Figura 31 - Detalhe da ferramenta utilizada no ensaio	46
Figura 32 - Esquema da peça preparada para o ensaio	47
Figura 33 - Peças preparadas para o ensaio	48
Figura 34 - Sangramento radial realizado	48
Figura 35 - Análise do Raio de Curvatura do Cavaco	49
Figura 36 - Microscopia de varredura na amostra de alumínio	51
Figura 37 - Microscopia Equipamento de medição de dureza (Rockwell)	52
Figura 38 - Peças preparadas para o ensaio	53
Figura 39 - Ferramentas utilizadas nos ensaios.....	53
Figura 40 - Microscopia de varredura da ferramenta	54
Figura 41 - Influência do avanço no Grau de Recalque no torneamento do alumínio	55

Figura 42 - Influência do avanço no ângulo de cisalhamento no torneamento do alumínio.....	56
Figura 43 - Influência do avanço na deformação por cisalhamento no torneamento do alumínio.....	57
Figura 44 - Influência do avanço na velocidade de saída do cavaco no torneamento do alumínio.....	58
Figura 45 - Influência do avanço na velocidade de cisalhamento no torneamento do alumínio.....	58
Figura 46 - Influência do Avanço no Raio de Curvatura do Cavaco (Ang Saída 4,6°)	59
Figura 47 - Fixação do Bedame no Suporte para Ferramenta	60
Figura 48 - Fixação do suporte no porta ferramentas do torno	61
Figura 49 - Aresta de corte mal fabricada	62
Figura 50 - Topografia da Superfície de Saída da Ferramenta	63
Figura 51 - Imagem de Fases na Superfície de Saída da Ferramenta.....	64
Figura 52 - Pontos de Análise da Composição Química	64
Figura 53 - Danos Mecânicos na Peça	65
Figura 54 - Alinhamento da Peça com a Contra Ponta e Posicionamento para Ensaio	66
Figura 55 - Fixação adequada da peça no sistema de fixação do torno	66
Figura 56 - Influência do Avanço no Raio de Curvatura do Cavaco (Ang Saída -5,7°)	67
Figura 57 - Influência do avanço na razão h'/rc para ensaio com ferramenta com ângulo de saída de 4,6°	69
Figura 58 - Influência do avanço na razão h'/rc para ensaio com ferramenta com ângulo de saída de -5,7°	69
Figura 59 - Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de 4,6° e avanço de 0,042 mm/rev.	70
Figura 60 - Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de 4,6° e avanço de 0,221 mm/rev.	71
Figura 61 - Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de -5,7° e avanço de 0,042 mm/rev	71
Figura 62 - Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de -5,7° e avanço de 0,221 mm/rev.	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

D	- Diâmetro da peça
f	- Avanço
h	- Espessura de corte
h'	- Espessura do cavaco
n	- Número de rotações por minuto
r	- Raio de curvatura do cavaco
R_c	- Grau de recalque
V_c	- Velocidade de corte
V_{cav}	- Velocidade de saída do cavaco
V_{cis}	- Velocidade no plano de cisalhamento
V_e	- Velocidade de efetiva
V_f	- Velocidade de avanço

Gregos

- α - Ângulo de folga
- β - Ângulo de cunha da ferramenta
- ϕ - Ângulo de cisalhamento
- γ - Deformação por cisalhamento
- γ_0 - Ângulo de saída da ferramenta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 TORNEAMENTO.....	14
2.1.2 Classificação.....	17
2.2 FORMAÇÃO DO CAVACO.....	21
2.2.1 Mecanismo de Formação do Cavaco	21
2.2.2 Corte Ortogonal	23
2.2.3 Tipos de Cavaco	30
2.2.3.1 Cavacos Contínuos	32
2.2.3.2 Cavacos Parcialmente Contínuos.....	33
2.2.3.3 Cavacos Descontínuos.....	34
2.2.3.4 Cavacos Segmentados.....	35
2.2.4 Formas de Cavaco	36
2.3 CONTROLE DO CAVACO	36
2.3.1 Problemas do Cavaco Contínuo.....	37
2.3.2 Controle da Forma do Cavaco	37
2.4 O ALUMÍNIO	41
2.4.1 Características químicas e físicas.....	41
2.4.2 Ligas de alumínio	42
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	46
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	50
3.2 MATERIAL USINADO	50
3.3 MÁQUINA FERRAMENTA UTILIZADA	52
3.4 FERRAMENTAS UTILIZADAS	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5 CONCLUSÕES	73
6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	75

7 REFERÊNCIAS..... 76

ANEXO A..... 78

ANEXO B..... 79

ANEXO C..... 80

ANEXO D..... 81

ANEXO E..... 82

ANEXO F..... 83

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação com remoção de cavaco. Segundo Ferraresi (1970, apud MACHADO; SILVA, 2004) a usinagem é uma “operação que ao conferir à peça forma, ou dimensões, ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, produzem cavaco”. E por cavaco entende-se: “porção do material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular”.

No processo de usinagem forma-se uma nova superfície na peça, ou pela formação do cavaco contínuo, quando se usina materiais dúcteis, ou forma fluxo de cavacos quebrados em pedaços, quando se usina materiais frágeis.

O cavaco, nas diversas operações de usinagem, pode assumir diferentes formas. Assim, o controle do cavaco possui grande importância nos processos de usinagem, visto que, cavacos longos são indesejáveis tanto pelo fato da possibilidade de acidentes graves com operados das máquinas ferramentas, quanto por danificar a própria máquina, ou levar a quebra da ferramenta.

De acordo com Machado e Silva (2004) as principais preocupações do processo de usinagem estão voltadas para acabamento superficial, tolerâncias obtidas, sendo esses fatores responsáveis pela qualidade da peça produzida, e na produtividade com baixo custo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TORNEAMENTO

O torneamento é definido como o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo, como mostra as (figura 1) e (figura 2) (NBR 6175, 1971).

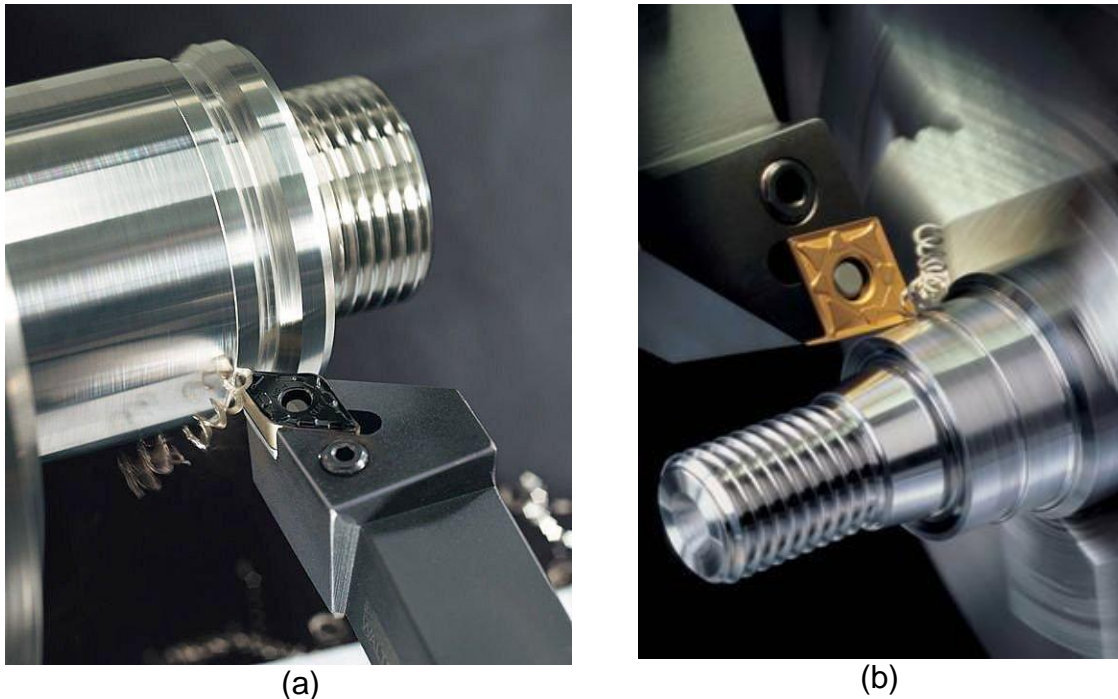


Figura 1 - Processos de Torneamento

Fonte: Directindustry e Departamento de Engenharia de Produção da UFJF

Os movimentos entre a ferramenta e a peça durante a usinagem são aqueles que permitem a ocorrência do processo de usinagem. Por convenção, os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo-se a peça parada e, portanto, todo movimento sendo realizado pela ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

De acordo com Ferraresi (1970) os movimentos que tomam parte diretamente na remoção de material (cavaco) são:

O movimento de corte é o movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única remoção de cavaco, durante uma volta ou um curso.

O movimento de avanço é o movimento entre a peça e a ferramenta, que associado ao movimento de corte, origina um levantamento repetido ou contínuo do cavaco durante várias revoluções ou cursos.

O movimento efetivo de corte é o resultante dos movimentos de corte e o de avanço, realizados simultaneamente.

Esses movimentos possuem direções instantâneas que são definidas como: direção de corte, direção de avanço e direção efetiva de corte. Essas direções são mostradas na Figura 2.

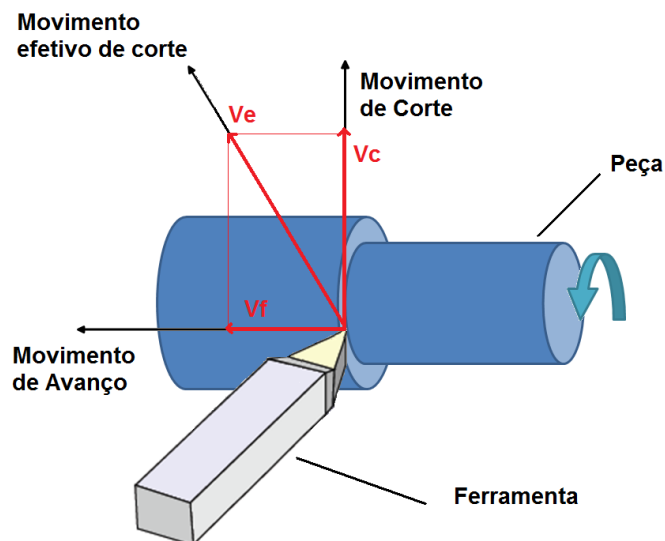


Figura 2 - Velocidades e Direção dos movimentos efetivos de corte, de avanço e efetivo no torneamento

De acordo com Ferraresi (1970) são definidas a seguir as velocidades envolvidas no processo de remoção do cavaco: a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a velocidade efetiva de corte.

a) Velocidade de Corte (V_c)

É a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte.

Para o processo de torneamento que envolve movimentos de rotação a velocidade de corte é calculada pela Equação 1:

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} [m / \min] \quad (1)$$

Onde:

D = diâmetro inicial da peça (mm)

n = rotação da peça (rpm)

b) Velocidade de Avanço (V_f)

A velocidade de avanço é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido do avanço (f). O avanço é definido como o movimento da ponta da ferramenta (mm/rev).

$$V_f = f . n [mm / \min] \quad (2)$$

Onde:

f = avanço em mm/rev

n = rotação da peça (rpm)

c) Velocidade Efetiva de Corte (V_e)

É a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo direção efetiva de corte. Essa velocidade é calculada vetorialmente como mostra a equação a seguir:

$$\vec{V}_e = \vec{V}_c + \vec{V}_f \quad (3)$$

A determinação das velocidades de corte e de avanço, e por consequência da velocidade efetiva de corte mais adequada, depende da operação de torneamento e dos materiais da ferramenta e da peça.

2.1.2 Classificação

Os processos de torneamento podem ser classificados quando à forma da trajetória e quanto à finalidade. Essas definições estão contidas na norma NBR 6175 e estão sendo mostradas abaixo.

As operações de torneamento, em relação à finalidade, podem ser classificadas em torneamento de desbaste e torneamento de acabamento:

- a) Acabamento: Operação de usinagem destinada a obter na peças as dimensões finais ou acabamento superficial especificado, ou ambos.
- b) Desbaste: Operação de usinagem, anterior à de acabamento, visando obter na peça a forma e dimensões próximas as finais.

Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo.

1) Torneamento retilíneo: Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. O Torneamento retilíneo pode ser:

- a) Torneamento cilíndrico: Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (Figura 3) ou interno (Figura 4).

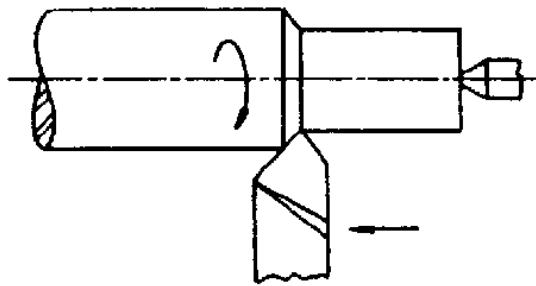


Figura 3 - Torneamento Cilíndrico Externo
Fonte: NBR 6175 (1971)

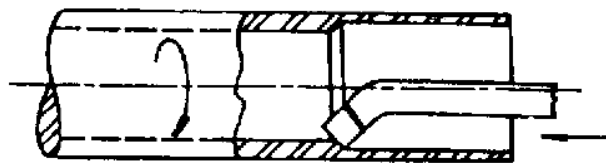


Figura 4 - Torneamento Cilíndrico Interno
Fonte: NBR 6175 (1971)

Quando o torneamento cilíndrico visa obtenção de um entalhe circular na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, o torneamento é denominado sangramento axial (Figura 5).

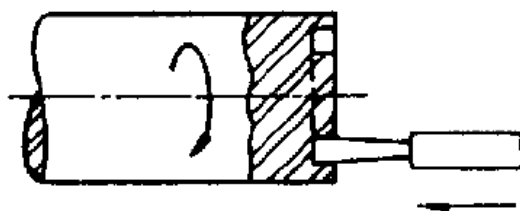


Figura 5 - Sangramento Axial
Fonte: NBR 6175 (1971)

- b) Torneamento cônico: Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (Figura 6) ou interno (Figura 7).

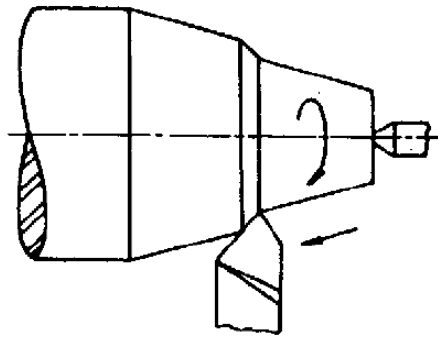


Figura 6 - Torneamento Cônico Externo
Fonte: NBR 6175 (1971)

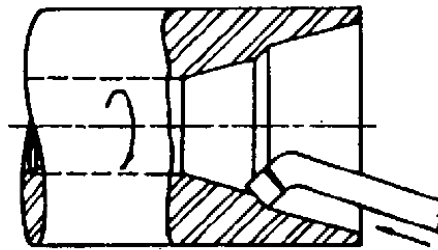


Figura 7 - Torneamento Cônico Interno
Fonte: NBR 6175 (1971)

- c) Torneamento radial: Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina. Quando o torneamento radial visa à obtenção de uma superfície plana, é denominado torneamento de faceamento (Figura 8). Quando o torneamento radial visa à obtenção de um entalhe circular, é denominado sangramento radial (Figura 9). O corte é um caso particular do sangramento radial, tendo por finalidade o seccionamento da peça em duas partes.

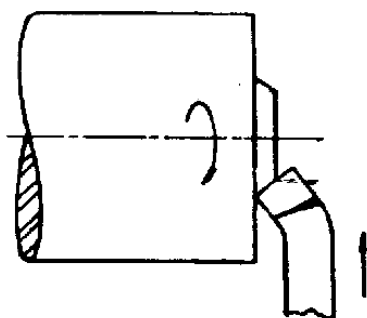


Figura 8 - Torneamento de Faceamento
Fonte: NBR 6175 (1971)

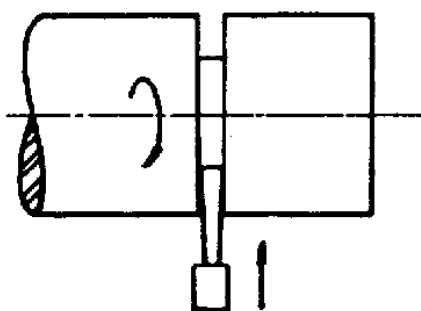


Figura 9 - Sangramento Radial
Fonte: NBR 6175 (1971)

- d) Perfilamento: Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea radial (Figura 10) ou axial (Figura 11), visando à obtenção de uma forma definida, determinada pelo perfil da ferramenta.

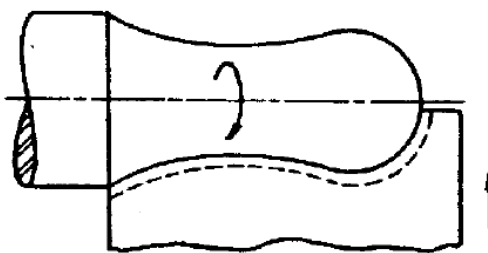


Figura 10 - Perfilamento Radial
Fonte: NBR 6175 (1971)

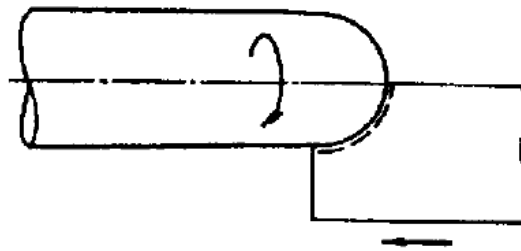


Figura 11 - Perfilamento Axial
Fonte: NBR 6175 (1971)

- e) Torneamento curvilíneo: Processo de torneamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea (Figura 12).

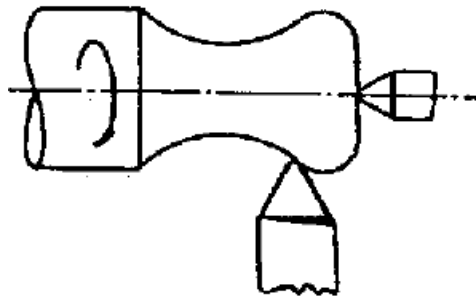


Figura 12 - Torneamento Curvilíneo
Fonte: NBR 6175 (1971)

2.2 FORMAÇÃO DO CAVACO

2.2.1 Mecanismo de Formação do Cavaco

Segundo Ferraresi (1970), a formação de cavaco, em geral, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido, se processa da seguinte forma:

- a) Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção do material (ainda solidária a peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.

b) O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento sejam suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja com isto uma perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento. Para facilitar o tratamento matemático dado à formação do cavaco, esta região é assimilada a um plano, dito simplesmente plano de cisalhamento. Este plano é tomado quanto possível paralelo aos planos de cisalhamentos dos cristais dessa região e é definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ (figura 13).

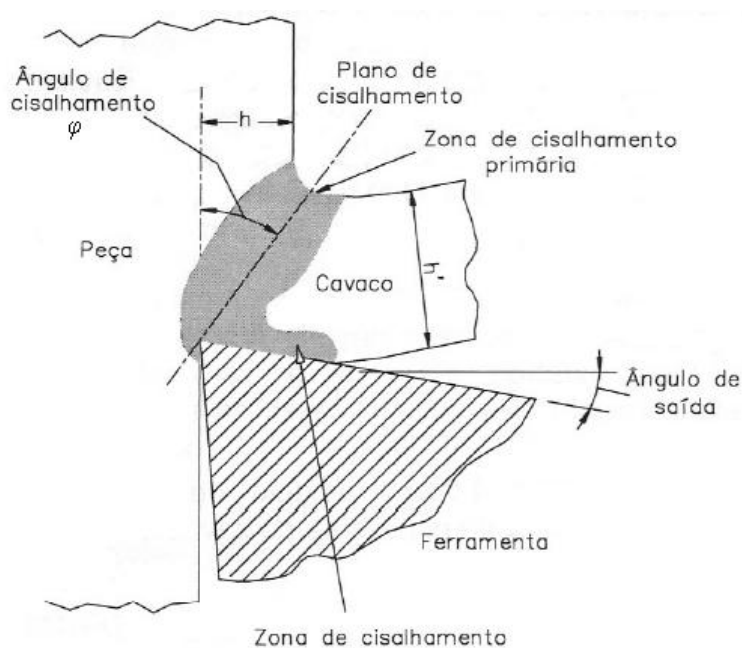


Figura 13 – Esquema mostrando zonas de cisalhamento
Fonte: Machado e Silva (2004)

c) Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região do cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem.

d) Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal ocorre, uma nova porção de

material (imediatamente adjacente a porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

O escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta não obedece, necessariamente, ao Modelo de Coulomb do atrito, uma vez que as tensões normais, a velocidade relativa entre as superfícies e, em geral, a temperatura são muito elevadas. Isso provoca o surgimento de uma região denominada “zona de cisalhamento secundário”. Essa região é caracterizada também por altíssimas deformações plásticas cisalhantes. (MACHADO; SILVA, 2009)

2.2.2 Corte Ortogonal

Segundo Machado e Silva (2009), no corte ortogonal, a aresta de corte é uma reta normal à direção de corte e à direção de avanço, de maneira que a formação do cavaco pode ser considerada um fenômeno bidimensional e que ocorre em um plano normal à aresta cortante, ou seja, o plano de trabalho.

A Figura 14 ilustra alguns exemplos de usinagem que se aproximam do corte ortogonal no torneamento.

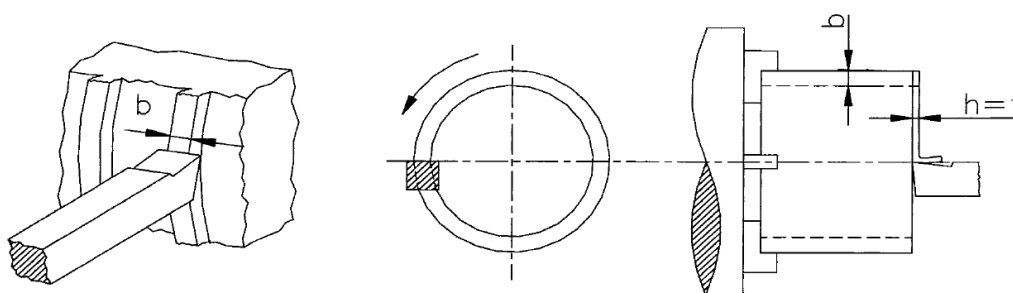


Figura 14 – Exemplos de Corte Ortogonal
Fonte: Ferraresi (1970)

A Figura 15 ilustra o corte ortogonal, e as principais variáveis envolvidas.

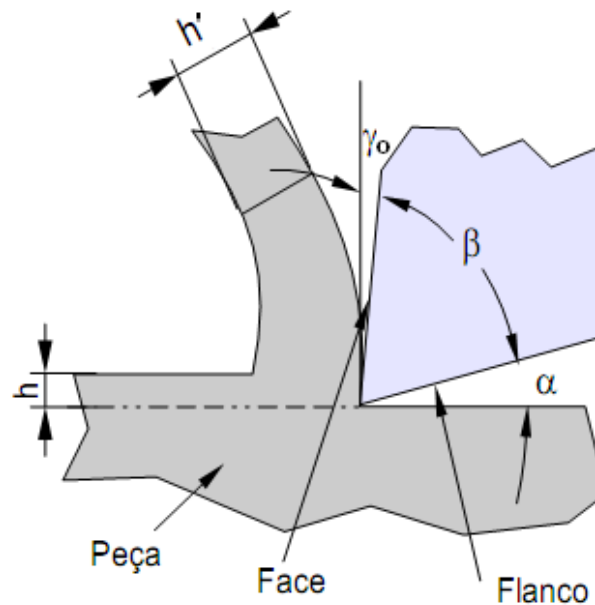


Figura 15 – O Corte Ortogonal
Fonte: Stoeterau (2007)

Onde:

α = ângulo de folga

β = ângulo de cunha

γ_0 = ângulo de saída

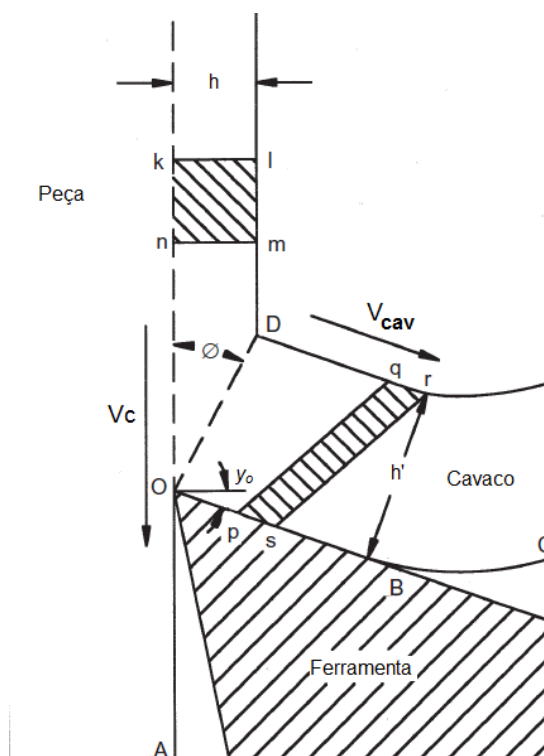
h = espessura de usinagem (antes da retirada do cavaco)

h' = espessura de corte (depois da retirada do cavaco)

De acordo com Machado e Silva (2009) algumas outras simplificações são admitidas, que permitem um tratamento matemático do corte ortogonal e podem ser estendidas a outras operações de usinagem além do torneamento:

- Os cavacos são contínuos, sem formação de aresta postiça de corte (APC).
- Não há contato entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada.
- A espessura de corte (h), equivalente ao avanço (f), é suficientemente pequena em relação à largura de corte (b).
- A largura da aresta de corte é maior que a largura de corte (b).
- A largura de corte (b) e a largura do cavaco (b') são idênticas.
- A aresta de corte é idealmente afiada e perpendicular ao plano de trabalho.

A Figura 16 mostra um volume de metal representado pela seção “klmn” movendo-se em direção à cunha cortante, segundo o modelo de corte ortogonal.



16 – Diagrama da Cunha Cortante
Fonte: Trent e Wright (2000)

Ao passar pelas etapas anteriormente descritas para a formação do cavaco, a zona de cisalhamento primária é representada pelo segmento OD (Figura 16). Após deformar-se plasticamente, a seção “klmn” se transforma na seção “pqrs”, que entra em contato com a superfície de saída da ferramenta. Essa região de contato é representada pelo segmento OB da mesma figura, denominada zona de cisalhamento secundário (MACHADO; SILVA, 2004).

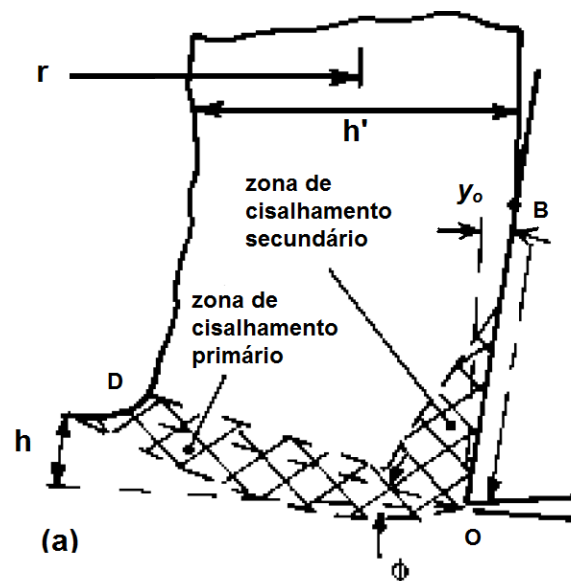
Do exposto conclui-se que o fenômeno da formação do cavaco, nas condições normais de trabalho com ferramenta de metal duro ou de aço rápido é um fenômeno periódico, inclusive a formação do cavaco contínuo. (FERRARESI, 1970)

Segundo Machado e Silva (2004) podemos considerar que adjacente ao volume de material representado por “klmn” (Figura 16), existe outro material similar, e subsequente a este, existe outro, e assim sucessivamente, caracterizando um processo cíclico que pode ser representado da seguinte forma:



Figura 17 – Processo Cíclico de Formação do Cavaco

Segundo Childs et al (2000) a figura 18 (a) mostra a espessura do cavaco h' que é formado a partir de uma espessura de corte h (igual ao avanço) por uma ferramenta com ângulo de saída γ_0 . A reta OB representa a área de contato entre o cavaco e a superfície de saída e r é o raio de curvatura do cavaco. As regiões achuradas representam a zona de cisalhamento primário (entorno da reta OD) e a zona de cisalhamento secundário.



$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma_o}{Rc - \operatorname{sen} \gamma_o} \quad (6)$$

O valor do grau de recalque, Rc , e, portanto do ângulo de cisalhamento é uma boa indicação da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primário. (Machado e Silva, 2004)

A figura 18 (c) mostra o triângulo de velocidades, sendo V_{cis} , a velocidade no plano de cisalhamento primário, V_c representa a velocidade de corte, e V_{cav} a velocidade de saída do cavaco. O valor de V_{cis} , e de V_{cav} , podem ser determinados em relação a V_c através da equação 7 (CHILDS et al, 2000).

$$\frac{V_{cis}}{\cos \gamma_o} = \frac{V_{cav}}{\sin \phi} = \frac{V_c}{\cos(\phi - \gamma_o)} \quad (7)$$

De acordo com Trent e Wright (2000) a deformação por cisalhamento que ocorre na formação do cavaco, pode ser idealizada considerando o deslizamento dos planos conforme a (figura 19).

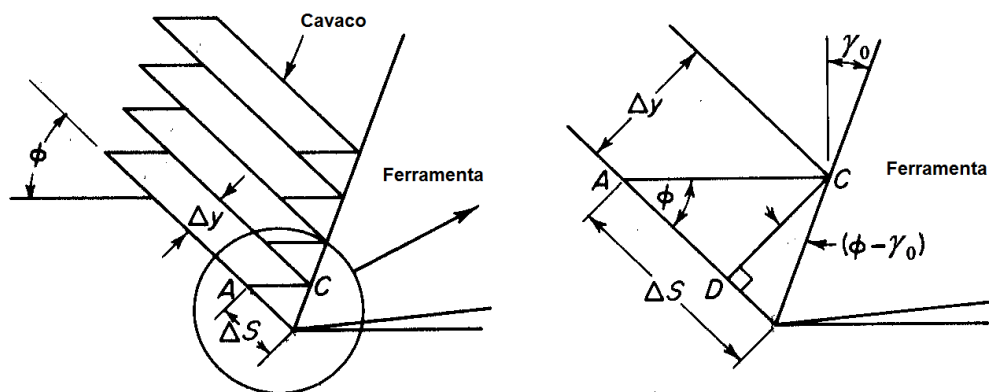


Figura 19 – O modelo de deformação por cisalhamento
Fonte: (Piispanen, apud Trent; Wright, 2000)

Logo temos que:

$$\gamma = \frac{\Delta S}{\Delta y} = \frac{OA}{CD} = \frac{OD}{CD} + \frac{DA}{CD} \quad (8)$$

$$\gamma = \tan(\phi - \gamma_o) + \cot \phi \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{\cos \gamma_o}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma_o)} \quad (10)$$

A deformação por cisalhamento pode também ser escrita como a razão entre V_{cis} e a componente normal de V_c em relação ao plano de cisalhamento:

$$\gamma = \frac{V_{cis}}{V_c \sin \phi} \quad (11)$$

A deformação equivalente, segundo Childs et al (2000), é um $1/\sqrt{3}$ de γ , então:

$$\bar{\varepsilon} \equiv \frac{V_{cis}}{\sqrt{3} V_c \sin \phi} = \frac{\cos \gamma_o}{\sqrt{3} \sin \phi \cos(\phi - \gamma_o)} = \frac{\cos \gamma_o}{\sqrt{3} \cos^2(\phi - \gamma_o)} \frac{h'}{h} \quad (12)$$

Segundo Trent e Wright (2000), a idéia de deformação por cisalhamento e a forma com que é mensurada em termos de unidade, pode ser simplificada através do gráfico da (figura 20).

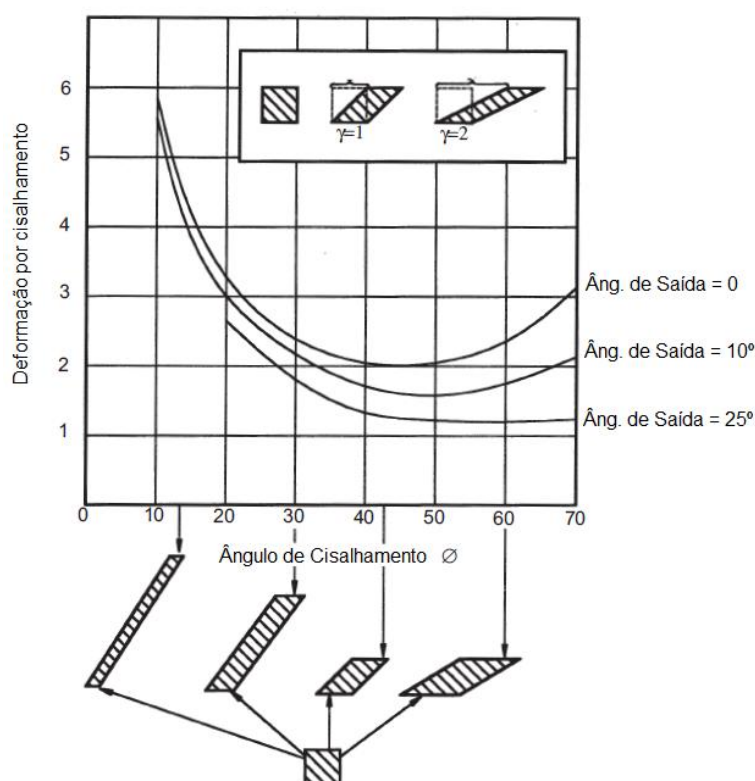


Figura 20 – Deformação por cisalhamento versus ângulo de cisalhamento para três ângulos de saída diferentes.

Fonte: Trent e Wright (2000)

O deslocamento de uma face de um cubo, que representa um volume de material, é a unidade de deformação (figura 20). A deformação mínima torna-se menor quanto maior é o ângulo de saída, e se o ângulo de saída pudesse ser muito grande, a deformação no cavaco que está se formando poderia ser muito pequena. Entretanto, ângulo de saída muito pequeno enfraquece a ferramenta e leva à fratura. Os ângulos de saída superiores a 30° raramente são utilizados (TRENT; WRIGHT, 2000).

2.2.3 Tipos de Cavaco

As propriedades da peça a ser usinada, tais como resistência ao escoamento, resistência ao cisalhamento sob carga de compressão, ductilidade e o comportamento do material no atrito, dureza e as características do encruamento, também influenciam na formação do cavaco. Os cavacos gerados a partir da usinagem de materiais dúcteis sofrem deformação plástica extensa, além de serem

longos, contínuos e permanecerem mais tempo em contato com a superfície de saída da ferramenta, causando assim um maior calor gerado pelo atrito. Por outro lado, alguns materiais, como o ferro fundido, não possuem ductilidade para sofrer uma considerável deformação plástica. Conseqüentemente, o material tem um comportamento frágil produzindo assim cavacos em forma de pequenos fragmentos, denominados cavacos descontínuos (ASM HANDBOOK, 1995)

Os parâmetros de corte também influenciam na formação do cavaco. Esses parâmetros incluem materiais para ferramentas, ângulos de ferramentas, geometrias de ponta (que podem mudar devido ao desgaste, a velocidade de corte, avanço, e profundidade de corte), e o ambiente de usinagem (desvios de máquinas-ferramenta, fluidos de corte, e assim por diante (ASM HANDBOOK, 1995).

Segundo Childs et al (2000) os principais fatores que a influenciam o fluxo de cavaco sobre a superfície da saída são o ângulo de saída da ferramenta, o atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte e o encruamento do material durante o processo de corte.

A (figura 21) ilustra os principais fatores que influenciam na forma final do cavaco em processos de usinagem de uma maneira geral.



Figura 21 – Fatores que Influenciam na Forma do Cavaco

Segundo Machado e Silva (2009), morfologicamente, os cavacos podem ser contínuos, descontínuos e segmentados. Entretanto, em uma classificação mais detalhada, os tipos de cavaco podem ser: contínuo, parcialmente contínuo, descontínuo e segmentado.

2.2.3.1 Cavacos Contínuos

Os cavacos contínuos (figura 22) são formados na usinagem de aços baixa liga, alumínio e cobre, que são matérias dúcteis. Na zona de cisalhamento primário o metal cisalha com grandes quantidades de deformações (2 a 5 mm/mm), permanecendo homogêneo, sem fragmentação. Sendo que mesmo que esses cavacos na forma de fina não apresentarem evidência de fratura ou trinca, uma nova superfície está sendo gerada e isso envolve fratura. Segundo Cook et al (1954, apud MACHADO; SILVA, 2004, p. 44) a formação do cavaco contínuo pode ser explicada como o desenvolvimento de um campo de tensão de tração na ponta da ferramenta, sendo resultado da curvatura imposta pela cunha cortante, iniciando a trinca para haver a fratura do material e depois desse campo de tensão de tração o material está sujeito a elevada tensão de tração, sendo essa tensão responsável por interromper a propagação da trinca e garantir a formação do cavaco contínuo.



Figura 22 – Cavacos contínuos
Fonte: Childs et al (2000)

Uma importante variável na para determinar se o cavaco será contínuo ou descontínuo é a tensão normal ao plano de cisalhamento, que sofre grande influência do ângulo de cisalhamento, ϕ , e pelas condições na interface cavaco-ferramenta, que é a zona de cisalhamento secundária. (MACHADO; SILVA, 2004)

Dois fatores devem ser considerados na formação do cavaco contínuo ou descontínuo. Primeiro deve haver uma tensão cisalhante no plano primário capaz de garantir a abertura e propagação da trinca na aresta cortante da ferramenta, Segundo o nível de tensão de compressão poderá ou não interromper a propagação dessa trinca no plano de cisalhamento primário. Essa análise é complexa visto que os dois fatores são dependentes da condição de interface cavaco-ferramenta, sendo que quanto maior a restrição de movimento do cavaco sobre a superfície de saída, maior será essa tensão para abertura de trinca e maior será a tensão de compressão no mesmo plano primário que poderá congelar a propagação da trinca. (MACHADO; SILVA, 2004)

Algumas variáveis podem favorecer a propagação da trinca, por diminuir a restrição ao movimento do cavaco no plano secundário e, por consequência, a tensão normal que tende a congelá-la e ao mesmo tempo reduzir a tensão de cisalhamento necessária para abertura da trinca. Pode-se citar a adição de elementos de livre-corte (chumbo, telúrio, selênio etc.) ao material da peça, a geometria da ferramenta (principalmente ângulo de saída), velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, inclusões no material e a rigidez da ferramenta como variáveis importantes no processo de formação do cavaco. (MACHADO; SILVA, 2004)

2.2.3.2 Cavacos Parcialmente Contínuos

Segundo Machado e Silva (2004) o Cavaco Parcialmente Contínuo é classificado como um cavaco intermediário entre o contínuo e o descontínuo, no qual a trinca se propaga até uma parte do plano primário de cisalhamento. De acordo com Cook et al (1954, apud MACHADO e SILVA, 2004, p. 45) dois fatores são importantes, primeiro, a energia elástica acumulada na ferramenta pode ser insuficiente para

continuação da trinca e, segundo, há presença de grande tensão de compressão no plano de cisalhamento primário, o que impede a propagação da trinca.

2.2.3.3 Cavacos Descontínuos

A formação de cavacos descontínuos (figura 23) é mais comum na usinagem de materiais frágeis, como ferros fundidos cinzentos e bronze, sendo que esses materiais não são capazes de suportar grandes deformações sem fratura. Mas, a variação dos parâmetros de usinagem como o baixa velocidade de corte, pequeno ângulo de saída e grandes avanços podem favorecer a formação de cavacos descontínuos em matérias semi-dúcteis. O aumento da velocidade de corte tende favorecer a formação de cavacos mais contínuos, visto que também se aumenta a geração de calor e o material, por conseguinte, mais dúctil, e, é mais difícil a entrada de “contaminantes” na interface cavaco-ferramenta, reduzindo assim a propagação da trinca (MACHADO; SILVA, 2004).



Figura 23 - Cavacos descontínuos
Fonte: Childs et al (2000)

No cavaco descontínuo a trinca propaga-se por todo o plano de cisalhamento primário, dessa forma, ocorrendo à fragmentação do cavaco. Também, a interface cavaco-ferramenta (zona de cisalhamento secundário) influencia no processo. No

início, a componente da força tangencial à superfície de saída é menor que a força necessária para o escorregamento do cavaco. Logo, desenvolve-se uma zona de material estática, sendo assim, a separação do cavaco ocorre aumentando-se a relação força tangencial/força normal (MACHADO; SILVA, 2004).

2.2.3.4 Cavacos Segmentados

Segundo Machado e Silva (2004) o processo de formação do cavaco segmentado é totalmente diferente do processo de formação do cavaco contínuo visto que os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos, sendo que existe muito pouca ou quase nenhuma deformação no interior desses segmentos. De acordo com (Cook, 1953; Shaw, 1954, apud MACHADO; SILVA, 2004, p. 47) explicam que a taxa de diminuição na resistência do material, devido ao aumento da temperatura (devido às deformações plásticas) iguala ou excede a taxa de aumento da resistência devido ao encruamento no plano de cisalhamento primário. Esse fato pode ser visto em materiais como titânio e suas ligas devido às pobres propriedades térmicas. Em um plano de cisalhamento particular começa a ocorrer o cisalhamento para formar o cavaco, nesse momento as tensões impostas pelo movimento da ferramenta contra a peça excedem o limite de escoamento do material. Assim, devido às pobres propriedades térmicas do material, altas temperaturas são desenvolvidas localmente. De acordo com (Shaw, 1954 e Shaw, 1967, apud MACHADO; SILVA, 2004, p. 47) esse fato provoca o amolecimento do material e, as deformações não mudam para um novo plano adjacente do material à medida que o material se movimenta, como ocorre nos cavacos contínuos. Continuando o processo de deformação, no plano de cisalhamento há uma rotação, que se afasta da ponta da ferramenta e movimenta-se por sobre a superfície de saída. Dessa forma, em outro plano mais favorável, o material mais frio é deformado plasticamente devido ao aumento da força provocada por essa rotação. De acordo com Rech (1964, apud MACHADO; SILVA, 2004, p. 47) esse processo já foi referido como “cisalhamento termoplástico catastrófico” e de acordo com Le Maire (1972, apud MACHADO;

SILVA, 2004, p. 47) foi referido como “cisalhamento adiabático” o que resulta em um processo cíclico de produção de cavacos na forma de serra dentada.

2.2.4 Formas de Cavaco

Quanto à sua forma, os cavacos podem ter a seguinte classificação: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. Entretanto a norma ISO 3685 (1993) classificou mais detalhadamente a forma dos cavacos. Esta classificação é dada de acordo com a (figura 24) (MACHADO; SILVA, 2009).

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 24 – Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais
Fonte: Machado e Silva (2009)

2.3 CONTROLE DO CAVACO

Nas operações de usinagem que utilizam corte contínuo em materiais dúcteis, o controle do cavaco pode ser imperativo para a produtividade da empresa. Esse problema se agrava quando novas gerações de ferramentas mais resistentes ao desgaste permitem o uso de altas velocidades de corte em máquina de comando numérico (CNC), em sistemas produtivos altamente automatizados, com mínima supervisão humana. (MACHADO; SILVA, 2009)

2.3.1 Problemas do Cavaco Contínuo

Segundo Machado e Silva (2009) a produção de cavacos longos pode causar os principais problemas listados abaixo:

- I. As baixas densidades efetivas desse tipo de cavaco, devido ao alto volume que ocupam, dificultam o manuseio nos processos subsequentes de manuseio e descarte.
- II. Podem aderir à peça, a partes da máquina, ou à ferramenta, criando situação de perigo ao operador por conta das altas velocidades e do fio de corte em cavacos de material endurecidos pelo encruamento.
- III. Podem prejudicar o acabamento superficial ao aderir à peça, ou mesmo levar à quebra da aresta de corte, causando danos a ferramenta.
- IV. Aumentam a força de usinagem, a temperatura e, em geral, diminuem a vida útil da ferramenta.
- V. Prejudicam o acesso do fluido de corte à área de formação de cavacos (efeito guarda-chuva).

As formas de cavacos longos são que causam maiores transtornos quanto à segurança e produtividade, exigindo, portanto, mais cuidado e especial atenção em seu controle. (MACHADO; SILVA, 2009)

2.3.2 Controle da Forma do Cavaco

Assim, para facilitar a quebra do cavaco, segundo DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2006) pode-se:

- Aumentar o avanço, que dentro do contexto do corte ortogonal representará a espessura do cavaco. Quanto menor a espessura do cavaco (h'), mais flexíveis (dúcteis) eles são e, assim, tornam-se mais difíceis de quebrar.
- Diminuir os ângulos de saída e/ou ângulo de inclinação da ferramenta.

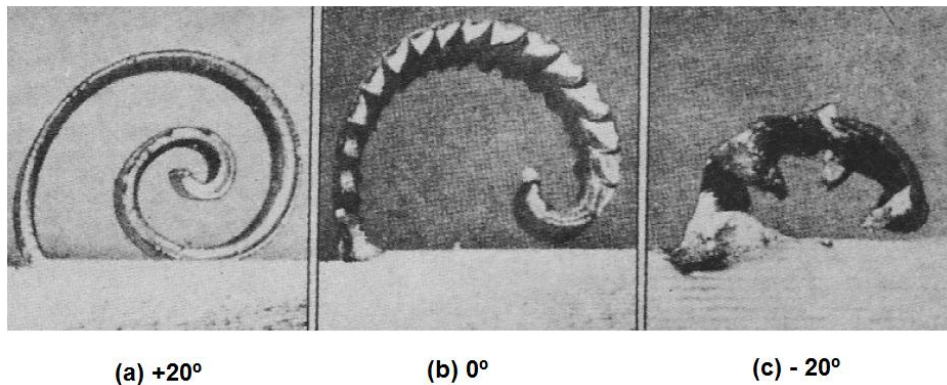


Figura 25 – Influência do ângulo de saída sobre a forma do cavaco na usinagem de aço
Fonte: Ferraresi (1977)

- Em baixas velocidades de corte os cavacos geralmente apresentam boa curvatura natural e, portanto, não costumam apresentar problemas com relação à quebra. Quando as velocidades de corte aumentam e atingem faixas que normalmente são utilizadas quando se utiliza ferramentas mais resistentes ao desgaste, o problema da quebra do cavaco passa a ter muita importância.
- Grandes profundidades de corte auxiliam o aumento da capacidade de quebra do cavaco;

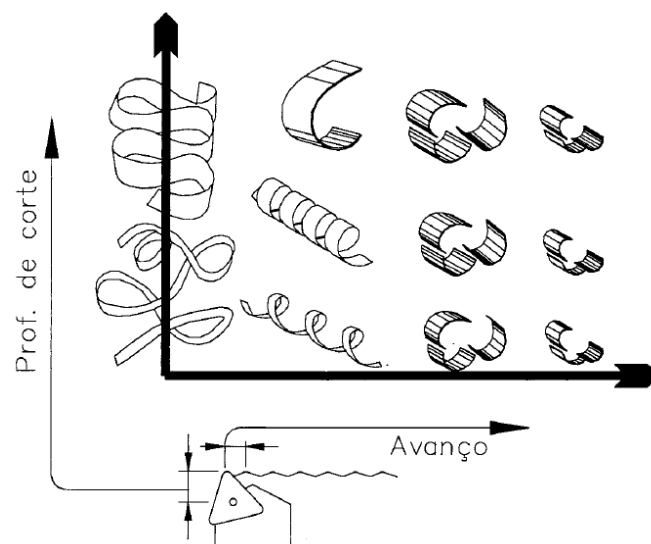


Figura 26 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos
Fonte: Machado e Silva (2009)

A mudança das condições de usinagem com o fim específico de se obter uma forma adequada do cavaco deve ser tanto quanto possível evitada, pois estas são fixadas

levando-se em consideração requisitos técnicos e econômicos do processo. Os ângulos negativos de saída e de inclinação, quando exagerados, aumentam os esforços de corte, podendo ocasionar vibrações indesejáveis na ferramenta ou mesmo impossibilitar o corte, no caso da máquina-ferramenta não possuir potência suficiente. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

A seguir temos a definição dos métodos mais usuais para o controle do cavaco que não incluem alterações nos parâmetros de corte.

a) Método da redução do avanço

Neste método a desaceleração intermitente do avanço promove a quebra periódica do cavaco pela redução da espessura do cavaco até valores muito pequenos (próximos a zero), conforme mostra a (figura 27). Isto pode ser conseguido por um programa particular de computador em um sistema CNC. Neste método, o avanço diminuto promove uma espessura de cavaco também ínfima, a ponto de não suportar o peso do corpo do cavaco, quebrando-se facilmente. (MACHADO, 2007)

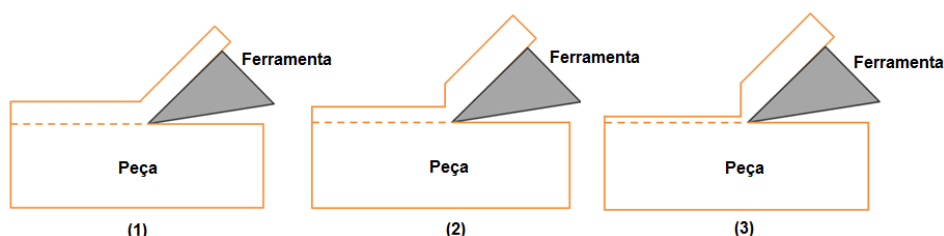


Figura 27 - Método da redução periódica do avanço
Fonte: Machado (2007)

A vantagem é que a periodicidade de desaceleração do avanço vai determinar o comprimento do cavaco, assim o programa CNC pode ser projetado para atender o freguês. A desvantagem é que esta desaceleração do avanço faz aumentar o tempo de corte, que para uma peça pode ser insignificante, mas num período longo de produção pode significar um custo adicional considerável. (MACHADO, 2007)

b) Injeção de fluido de corte a alta pressão

Neste método o fluido de corte é injetado a alta pressão na superfície de saída da ferramenta, contra a saída do cavaco. A força do jato promove a fragmentação do cavaco conforme a seqüência mostrada na (figura 28). (MACHADO, 2007)

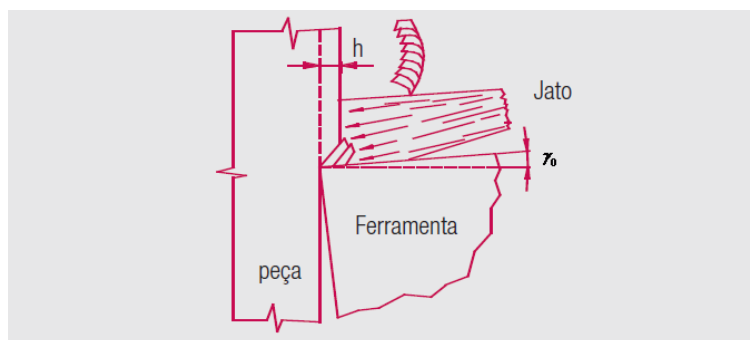


Figura 28 - Método da injeção de fluido de corte a alta pressão
Fonte: Machado (2007)

c) Quebra-cavacos

Os quebra cavacos são alterações presentes na face da ferramenta (figura 29), que tem como objetivo controlar o tamanho do cavaco, evitando a produção de cavacos longos, de modo que não ofereça risco ao operador, não obstrua o local de trabalho, e diminua o tempo de contato do cavaco com a ferramenta reduzindo a transferência de calor.

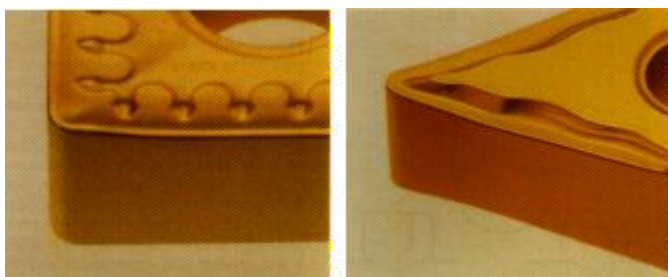


Figura 29 - Quebra-Cavaco apresentado na superfície de saída
Fonte: [6]

Segundo Machado e Silva (2004) o método mais utilizado para quebrar o cavaco, são os quebra cavacos integrais, que são aqueles presentes em formatos especiais na superfície de saída da ferramenta. Além desse tipo de quebra cavaco, existem também os quebra cavacos postiços, que segundo Machado (2007) caíram em desuso por serem mais um parâmetro a ser controlado e por sua eficiência depender também da habilidade do operador.

Segundo (MACHADO 2007), os quebra cavacos integrais tornaram-se um grande fator de pesquisa e de altos investimentos pelos fabricantes de ferramentas de corte. Desta forma cada operação de corte, para determinados parâmetros de corte e material da peça, possui produtos particularmente desenvolvidos.

2.4 O ALUMINIO

Segundo a Associação Brasileira do Alumino (ABAL) apesar do alumínio ser o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. Sendo que sua produção comercial iniciou-se a cerca de 150 anos. Atualmente, a produção industrial do alumino supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. E antes de ser descoberto como metal isolado, o alumínio acompanhou a evolução das civilizações trazendo um tom de modernidade e sofisticação aos mais diferentes artefatos.

2.4.1 Características químicas e físicas

De acordo com a ABAL alumínio é um metal branco acinzentado leve e não tóxico, não é encontrado em estado puro na natureza, mas sim sob apenas na forma combinada pelo fato de ser muito reativo. As suas características físico-químicas são:

Símbolo Químico: Al

Número Atômico: 5

Peso Atômico: 26,98153

Grupo da Tabela: 13

Configuração Eletrônica: [Ne].3s².3p¹

Classificação: Metal

Estado Físico (T=298K): Sólido

Densidade (g/cm³): 2,702

Ponto de Fusão (K): 933,7

Ponto de Ebulição (K): 2792,0

Condutividade Térmica (W/m.k): 235,0

Resistividade Elétrica (10⁻⁸.Ohm.m): 2,65

2.4.2 Ligas de alumínio

O alumínio fundido dissolve metais e substâncias metalóides como o silício (que atua como metal). Sendo que alguns constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida quando o alumínio se resfria e solidifica. Fazendo desse modo que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida. Os átomos podem ser visualizados como sendo arranjados em uma rede cristalina regular formando moléculas de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal. Sendo a função principal nas ligas de alumínio o aumento da resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades (ABAL, 2009).

O metal quente pode manter mais elementos de ligas em solução sólida do que quando frio. Assim, quando resfriado, ele tende a precipitar o excesso dos elementos de liga na forma de partículas duras, constituindo compostos intermediários, tais como: CuAl_2 ou MgSi_2 . Esses agregados de átomos metálicos tornam a rede cristalina ainda mais rígida (ABAL, 2009).

De acordo com a abal Os elementos de liga mais comuns adicionados ao alumínio, com as suas respectivas influências (quadro 1).

Elemento de liga	Percentagem Típica	Vantagem	Desvantagem
Cu	3 a 11%	<ul style="list-style-type: none"> - confere alta resistência mecânica - facilita trabalho de usinagem 	<ul style="list-style-type: none"> - diminui resistência à corrosão salina - fragilidade a quente
Si	12 a 13%	<ul style="list-style-type: none"> - aumenta fluidez na fundição - reduz coeficiente de dilatação - melhora a soldabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - diminui usinabilidade
Mg	> 8%	<ul style="list-style-type: none"> - confere alta soldabilidade - aumenta resistência a corrosão em meio salino - possibilita tratamento térmico de ligas de Al-Si 	<ul style="list-style-type: none"> - dificulta fundição devido a oxidação (borra) e absorção de impurezas (Fe e outros)
Zn	0,05 a 2,2%	<ul style="list-style-type: none"> - sempre associado ao Mg - confere alta resistência mecânica - aumenta ductilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - diminui resistência à corrosão salina - fragilidade a quente - alta contração em fundição
Mn	0,5 a 10,7%	<ul style="list-style-type: none"> - como corretor - aumenta resistência mecânica a quente 	<ul style="list-style-type: none"> - pequena diminuição da ductilidade

Quadro 1 – Principais elementos de liga e seus efeitos

Fonte: [1]

As ligas de alumínio podem ser divididas em dois grandes grupos:

a) Ligas tratáveis térmica ou mecanicamente:

- ligas tratáveis termicamente: Al-Zn-Mg, Al-Si-Mg;
- ligas endurecidas por trabalho mecânico (encruáveis): Al-Mg, Al-Si

b) Ligas para fundição

O (quadro 2) apresenta uma visão geral das séries de ligas de alumínio mais empregadas, juntamente com sua classificação pelo AA (Aluminum Association).

Ligas Tratáveis	Designação AA	Características	Usos
Al > 99,0%	1XXX	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Ótima resistência à corrosão - Ótima soldabilidade - Ótima conformabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Condutores elétricos - Revestimento em Alclads - Equip. químicos e alimentares - Embalagens - Refletores - Utensílios domésticos - Aeronáutica (Alclad com liga 2024)
Al-Cu	2XXX	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Boa resistência - Boa usinabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Peças usinadas (ambiente não corrosivo) - Aviões - Automóveis - Estruturas - Relojoaria
Al-Mn	3XXX	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Boa ductilidade - Média resistência - Excelente soldabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Tubos soldados - Caldeiraria - Peças fabricadas por embutimento
Al-Si	4XXX	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis por Encruamento - Média soldabilidade - Boa resistência mecânica 	<ul style="list-style-type: none"> - Peças forjadas (pouco usadas)
Al-Mg	5XXX	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis por Encruamento - Ótima resistência à corrosão salina - Boa soldabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Formas arquitetônicas e estruturais - Equip. químicos, alimentares, têxteis e de mineração - Depósitos de gás liquefeito - Navios - Ferragens
Al-Mg-Si	6XXX	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Fácil fabricação - Boa resistência mecânica - Excelente conformabilidade - Boa resistência à corrosão 	<ul style="list-style-type: none"> - Formas aeronáuticas - Formas estruturais - Embalagens - Equip. químicos, alimentares - Indústria elétrica
Al-Zn-Mg	7XXX	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Difícil produção (alto custo) - Excelente resistência mecânica - Boa conformabilidade - Alta soldabilidade - Melhor limite de - Boa usinabilidade - Boa resistência a ambiente industrial menos os salinos 	<ul style="list-style-type: none"> - Automóveis - Equipamentos têxteis e de mineração - Componentes de alta resistência - Aviões (concorre com aços de alta resistência devido ao baixo peso) - Indústria bélica

Ligas para fundição	Designação AA	Características	Usos
Al > 99,0%	1XX.X	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Ótima resistência à corrosão - Ótima soldabilidade - Ótima conformabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Utensílios domésticos - Acessórios p/ ind. Química - Rotores p/ motores de indução - Ferragens elétricas
Al-Cu	2XX.X	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Boa resistência mecânica - Boa usinabilidade - Fragilidade a quente 	<ul style="list-style-type: none"> - Peças fundidas e/ou usinadas sujeitas a esforços, operando em ambiente não corrosivo
Al-Si-Cu/Mg	3XX.X	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Fácil fabricação inclusive fundição sob pressão (FSP) - Boa resistência - Boa resistência à corrosão 	<ul style="list-style-type: none"> - Automóveis - Navios - Carcaças de ventiladores e bombas - Peças fundidas em geral sujeitas a solicitações de carga
Al-Si	4XX.X	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis por Encruamento - Excelente soldabilidade - Excelente fluidez na fundição - Baixa usinabilidade - Boa resistência à corrosão 	<ul style="list-style-type: none"> - Peças fundidas de paredes finas e intrincadas - Peças anodizadas p/ arquitetura - Utensílios domésticos - Peças p/ aparelhos industriais
Al-Mg	5XX.X	<ul style="list-style-type: none"> - Não tratável termicamente, exceto a AA 520.2 (9,5%Mg) - Melhores combinações de usinabilidade, propriedades mecânicas, resistência a corrosão e acabamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Peças fundidas que exigem a máxima resistência à corrosão - Navios - Peças ornamentais e anodizadas
Al-Sn e outros	8XX..X	<ul style="list-style-type: none"> - Tratáveis Termicamente - Excelente resistência à corrosão a óleos lubrificantes - Boa resistência à fadiga 	<ul style="list-style-type: none"> - Mancais e buchas em eixos de caminhões e laminadores

Quadro 2 – Principais ligas de alumínio.

Fonte: [1]

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados os procedimentos experimentais para a realização deste trabalho.

Por se tratar de um ensaio não padronizado, todo o processo é descrito de uma forma minuciosa afim de que ensaios semelhantes possam ser realizados.

Foi utilizada uma câmera de alta velocidade para a filmagem da formação do cavaco no corte ortogonal. Para isso foi obedecida todas as considerações listadas no capítulo anterior para que fosse assegurada essa premissa. A (figura 30) mostra o esquemático geral do ensaio.

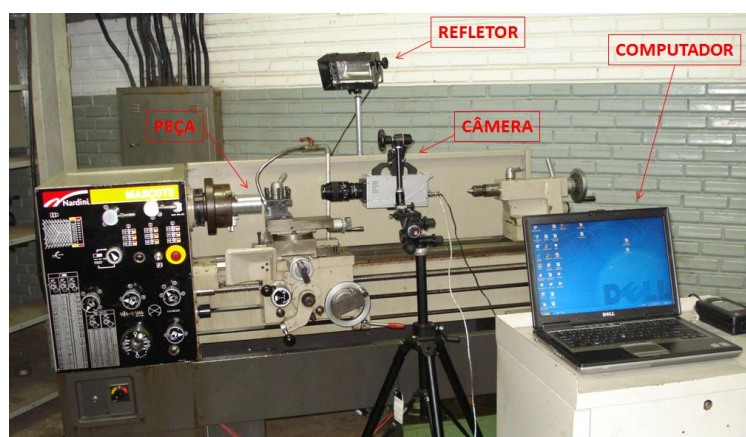


Figura 30 – Esquema do Ensaio

Foi utilizado um bedame como ferramenta, e a (figura 31) mostra esse detalhe.

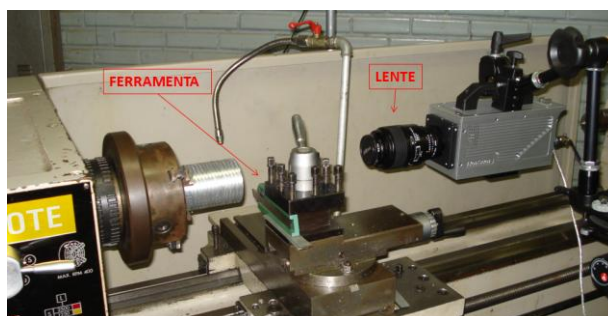


Figura 31 – Detalhe da ferramenta utilizada no ensaio

As peças do ensaio foram feitas de Alumínio e foram fabricadas segundo a (figura 32).

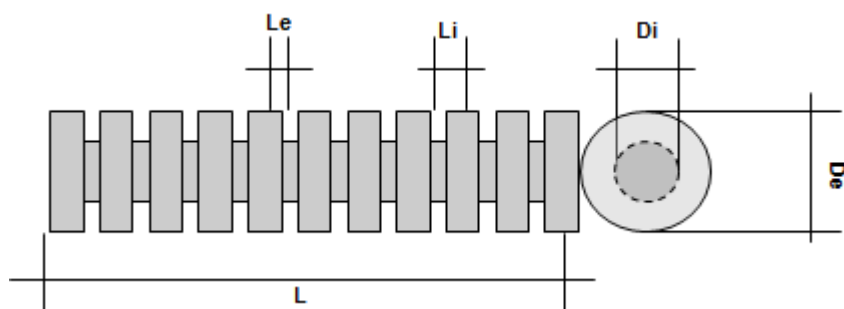


Figura 32 – Esquema da peça preparada para o ensaio

Onde:

Le: largura dos discos

Li: distância interna entre os discos

De: diâmetro externo

Di: diâmetro interno

L: comprimento

Foi criado o fluxograma de fabricação da peça com o nome “*ELABORAÇÃO DE DESENHO E FABRICAÇÃO DA PEÇA*” (ANEXO A). Para que as peças fossem fabricadas foi necessário encaminhar uma documentação de solicitação de fabricação (ANEXO B) para o LabTec - Laboratório de Tecnologia Mecânica da UFES. Foi enviado em anexo a esse documento o desenho de fabricação da peça (ANEXO C), para que os passos burocráticos e de qualidade necessários sejam revelados, e assim o tempo gasto antes do ensaio seja reduzido, tendo em vista que se trata de um ensaio novo, e por isso com muitas variáveis implícitas.

Após sua fabricação, as peças têm o aspecto segundo a (figura 33). Percebe-se que há uma parte onde não foram feitos os escalonamentos no eixo. Esse trecho é necessário para que a peça seja acoplada no sistema de fixação do torno, e desta forma tenha estabilidade suficiente para que o ensaio seja realizado.

Para que seja controlada a geometria da peça após sua fabricação, foi criada a tabela com o nome “*CONTROLE DE QUALIDADE DA PEÇA À SER UTILIZADA NO ENSAIO*” (ANEXO D). O objetivo da tabela é de fato controlar a formação do cavaco tendo plena consciência de todos dos parâmetros geométricos reais.



Figura 33 – Peças preparadas para o ensaio

As operações de torneamento utilizadas foram de sangramento radial, definida no capítulo 2. A ferramenta é posicionada em cada um dos escalonamentos de diâmetro maior da peça (D_e), e a operação é realizada até que seja obtido o menor diâmetro (D_i) mediante retirada de cavaco (figura 34). Esse procedimento é repetido pelos 15 escalonamentos de diâmetro maior da peça, e cada uma delas é filmado para que sejam analisados os raios de curvatura natural do cavaco futuramente.

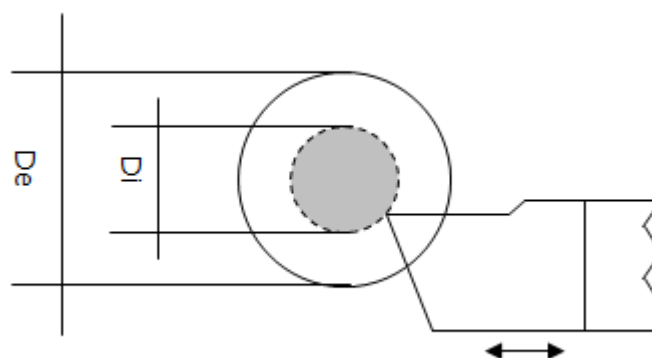


Figura 34 – Sangramento radial realizado

Em cada operação de sangramento radial variou-se o avanço e ângulo de saída da ferramenta objetivando analisar a influencia desses parâmetros no processo de formação do cavaco do alumínio. O cavaco de cada um dos ensaios foi guardado separadamente para que fosse medida sua espessura com um paquímetro digital. A partir da medição da espessura do cavaco e conhecendo a geometria da ferramenta e os parâmetros de corte é possível fazer análise do grau de recalque, ângulo de

cisalhamento, deformação por cisalhamento, velocidade de saída do cavaco e velocidade de cisalhamento.

O Fluxograma “*EXECUÇÃO DO ENSAIO*” (ANEXO E), foi desenvolvido para uma orientação do passo a passo do procedimento experimental, juntamente com a tabela “*CONTROLE DE PARAMETROS DE ENSAIO E CLASSIFICAÇÃO DO CAVACO*” (ANEXO F), desenvolvido para facilitar o gerenciamento do ensaio.

Após filmagem, as imagens geradas eram salvas e analisadas no software de análise de imagem UTHSCSA ImageTool, conforme a (figura 35).

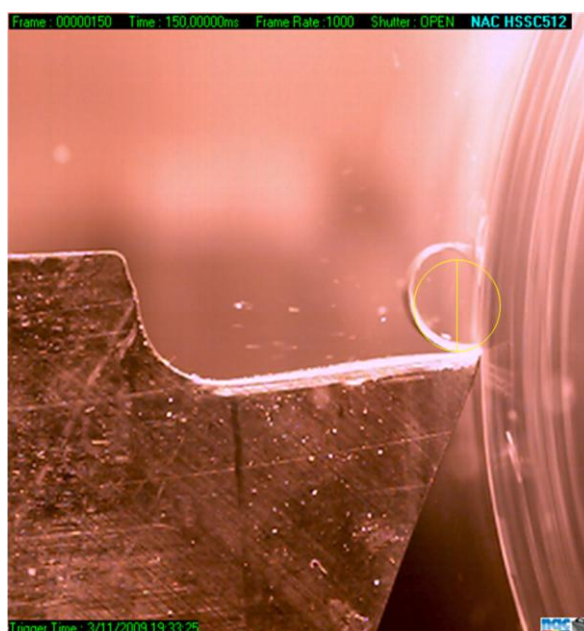


Figura 35 – Análise do Raio de Curvatura do Cavaco

O procedimento experimental foi desenvolvido e realizado no Laboratório de Tecnologia Mecânica – LabTec, no Laboratório do Microscópio Eletrônico de Varredura – LabMEV, no Engenharia dos Materiais – LabMat, da Universidade Federal do Espírito Santo.

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Foram realizados 3 ensaios, dos quais dois foram filmados para que fosse analisado o raio de curvatura natural do cavaco. O que diferenciou os três ensaios foi o ângulo de saída das ferramentas utilizadas. No Ensaio 1 (sem filmagem) foi utilizada ferramenta com ângulo de saída de 8° e ângulo de folga 26° , no Ensaio 2 a ferramenta possuía ângulo de saída de $4,5^\circ$ e ângulo de folga 24° , enquanto no Ensaio 3 foi utilizada ferramenta com ângulos de saída e folga de $-5,7^\circ$ e $19,5^\circ$, respectivamente. Entretanto a variação do avanço foi a mesma para todos os ensaios, para que fosse possível analisar tanto a influencia do avanço quanto a influencia do ângulo de saída na formação do cavaco. A variação do avanço para todos os três ensaios seguiu o planejamento conforme (quadro 3).

	RPM	Avanço [mm/rev]
1	630	0,042
2	630	0,057
3	630	0,063
3	630	0,073
5	630	0,091
6	630	0,109
7	630	0,117
8	630	0,125
9	630	0,151
10	630	0,176
11	630	0,199
12	630	0,221
13	630	0,235
14	630	0,251
15	630	0,271

Quadro 3 – Parâmetros e Variações Utilizadas nos Ensaios

3.2 MATERIAL USINADO

A determinação da composição química do alumínio utilizado nos ensaios foi realizado no LabMEV (Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura) UFES, em Vitória. A MEV foi realizada com ampliação de 150 vezes na amostra (figura 35).

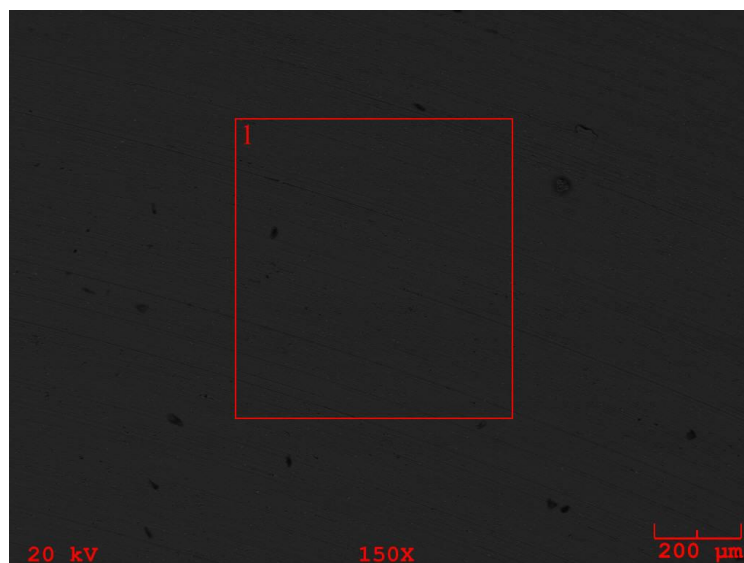


Figura 36 – Microscopia de varredura na amostra de alumínio

A composição química da região em destaque da (figura 36) pode ser visualizada no (quadro 4).

Al(%)	Mg(%)	Si (%)	Mn (%)	Cu (%)
97,883	1,674	0,274	0,089	0,079

Quadro 4 - Composição química da amostra de alumínio

Os ensaios de dureza foram realizados no Laboratório de Engenharia dos Materiais – LabMat, UFES. O teste de dureza realizado na amostra de alumínio foi método Rockwell na escala B (figura 37), no qual foram realizados 8 testes em diferentes localizações da amostra. Os resultados obtidos podem ser visualizados na (quadro 5). No qual a dureza média obtida foi 40,5 HRB.



Figura 37 – Equipamento de medição de dureza (Rockwell)

Ensaio	Dureza (HRB)
01	37,7
02	40,0
03	42,9
04	39,3
05	41,5
06	37,9
07	42,5
08	42,5

Quadro 5 – Ensaio de dureza

3.3 MÁQUINA FERRAMENTA UTILIZADA

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mecânica – LabTec, UFES. O Torno Mecânico utilizado foi da marca Nardini modelo Mascote Ms 205, como mostra (figura 38).



Figura 38 – Peças preparadas para o ensaio

3.4 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Os bedames utilizados nos ensaios possuem os seguintes ângulos e características geométricas (figura 39):

<p>ENSAIO 1 Ângulo de Saída: 8° Ângulo de Folga: 26°</p>
<p>ENSAIO 2 Ângulo de Saída: $4,6^{\circ}$ Ângulo de Folga: 24°</p>
<p>ENSAIO 3 Ângulo de Saída: $-5,7^{\circ}$ Ângulo de Folga: $19,5^{\circ}$</p>

Figura 39 – Ferramentas utilizadas nos ensaios

As ferramentas são de aço rápido, e sua análise de composição química se encontra no (quadro 6), e foi determinada a partir da análise em MEV do espaço demarcado na (figura 40).

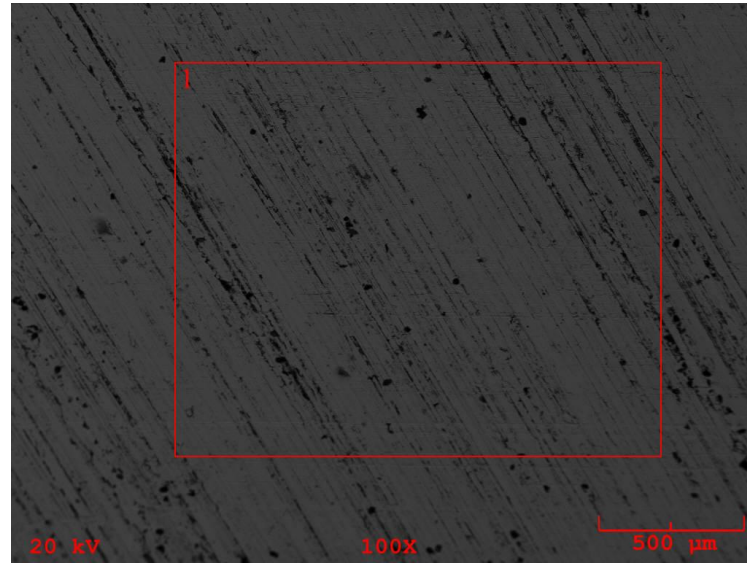


Figura 40 – Microscopia de varredura da ferramenta

C(%)	V(%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	Co (%)	Mo (%)	W (%)
9,367	0,588	4,585	0,094	79,141	1,679	1,707	2,840

Quadro 6 – Composição Química da ferramenta

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a medição da espessura dos cavacos gerados nos três ensaios conforme o planejamento descrito em tópicos anteriores foi analisado a influência do avanço e do ângulo de saída da ferramenta no grau de recalque, no ângulo de cisalhamento, na deformação por cisalhamento, na velocidade de cisalhamento e na velocidade de saída do cavaco.

Sabemos que o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento são bons indicadores da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária, e altos valores de grau de recalque e pequenos valores de ângulo de cisalhamento representam grande quantidade de deformação de cisalhamento. (MACHADO e SILVA, 2004). Nota-se que na (figura 41) o cavaco sofre menor deformação por cisalhamento na zona primária, ou seja, tem grau de recalque menor à medida que aumentamos o ângulo de saída da ferramenta, e essa diminuição da deformação também ocorre quando é aumentado o avanço da ferramenta.

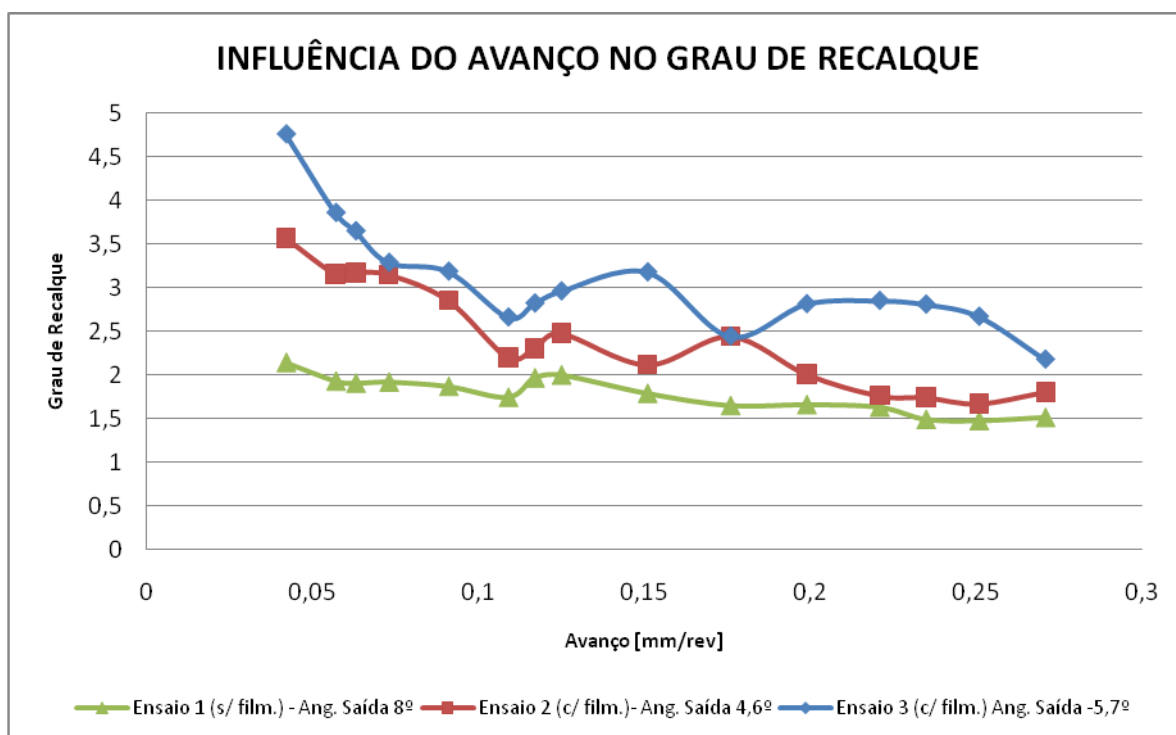


Figura 41 – Influência do avanço no Grau de Recalque no torneamento do alumínio

Analisando o ângulo de cisalhamento para os três ensaios, notamos a inversão no posicionamento das curvas (figura 42). Esse comportamento já era esperado, tendo

em vista que menores ângulos de cisalhamento representam maiores deformações na zona de cisalhamento primária. Nota-se que o aumento do avanço e o aumento do ângulo de saída tornam o ângulo de cisalhamento maior, ou seja, a porção de material retirada, determinada também pela espessura de corte (igual ao avanço), sofre uma menor deformação na zona de cisalhamento primária e, geometricamente falando, a espessura do cavaco aumenta tendo em vista que aumentamos o avanço.

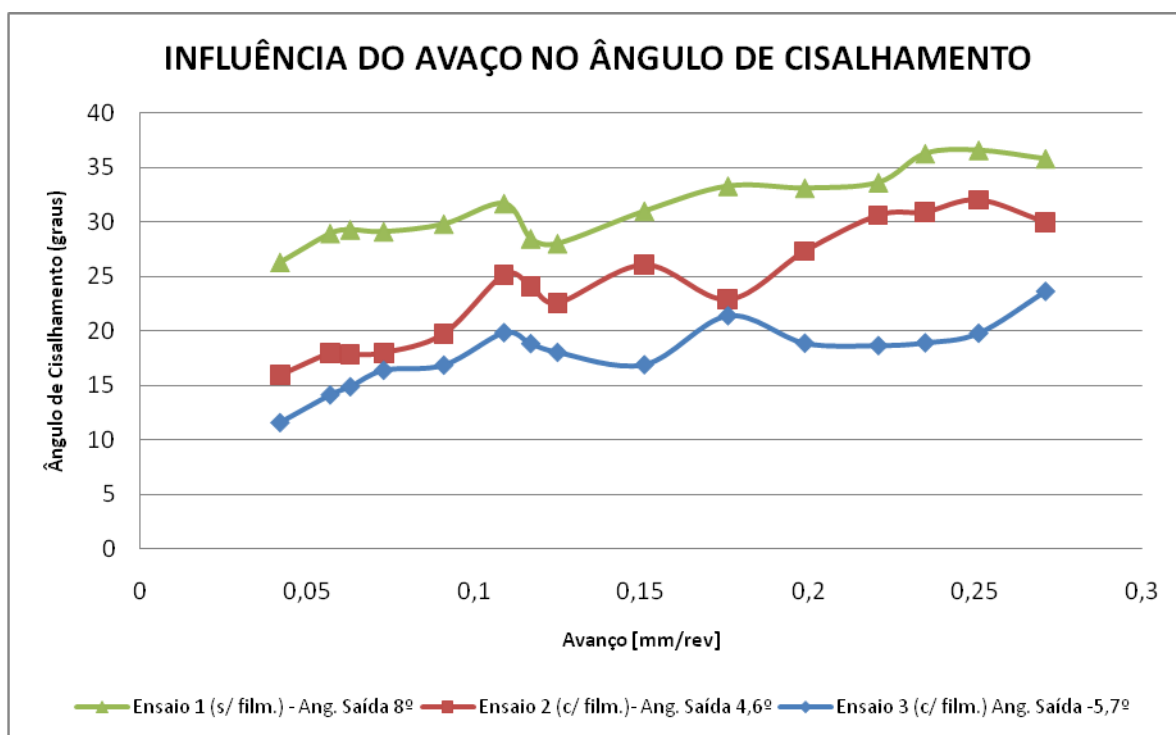


Figura 42 – Influência do avanço no ângulo de cisalhamento no torneamento do alumínio

Analisando a deformação por cisalhamento podemos comprovar as afirmações feitas anteriormente. Notamos que para os ensaios com maior grau de recalque (menores ângulos de cisalhamento) a deformação por cisalhamento na zona primária de fato é maior (figura 43). No Ensaio 3 c/ filmagem, a deformação foi maior tendo em vista que possuía o menor ângulo de saída dentre as ferramentas utilizadas em todos os ensaios.

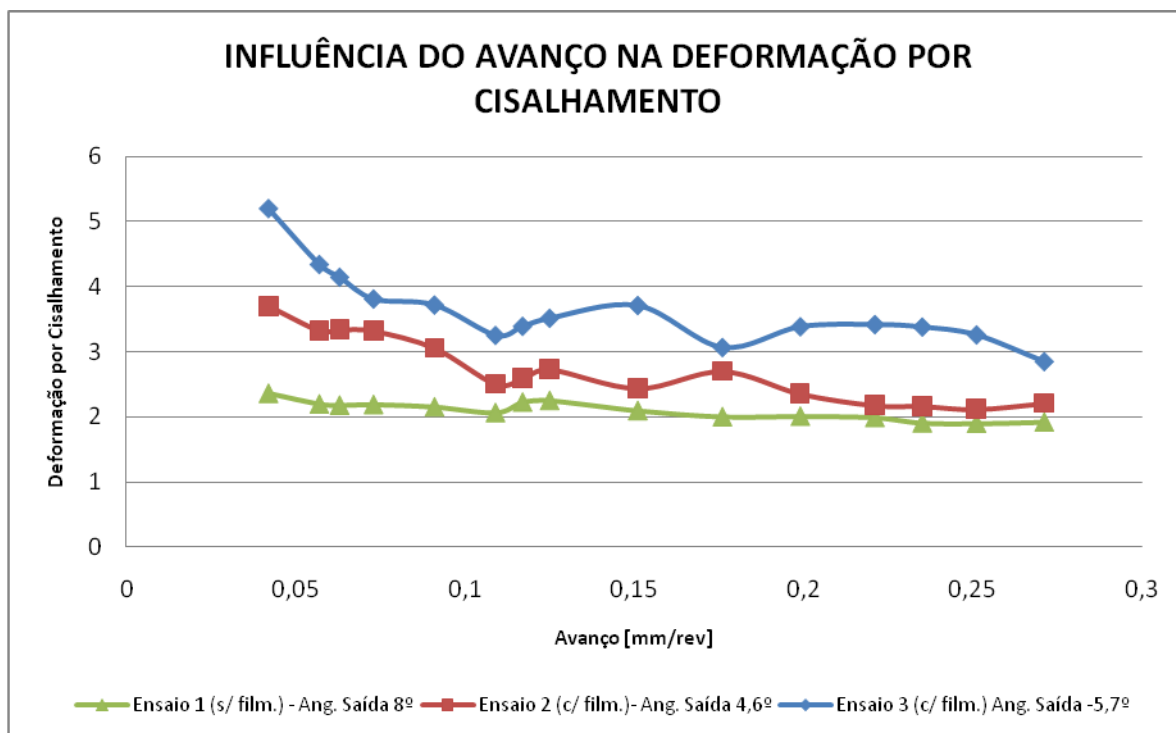


Figura 43 – Influência do avanço na deformação por cisalhamento no torneamento do alumínio

Para as ferramentas com maior ângulo de saída, a velocidade de saída do cavaco é maior, tendo em vista que a restrição a passagem do cavaco é menor (figura 44). A medida que aumentamos o avanço, a velocidade de saída do cavaco também aumenta, tendo em vista que quanto maior o ângulo de saída e maior o avanço, maior também será o ângulo de cisalhamento. Este afetará diretamente na velocidade de saída do cavaco, de acordo com as relações trigonométricas definidas no capítulo de revisão bibliográfica. Sabendo que existe uma relação vetorial entre a velocidade de corte, a velocidade de cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco, é possível analisar também a velocidade de cisalhamento (figura 45).

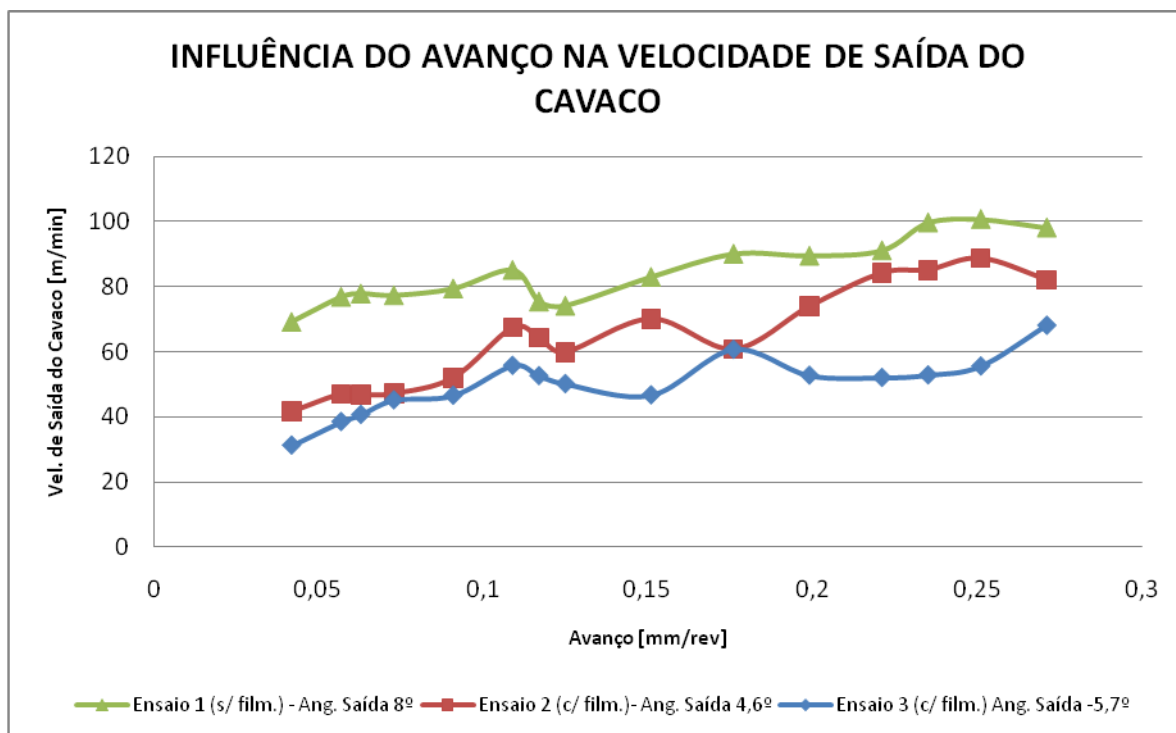


Figura 44 – Influência do avanço na velocidade de saída do cavaco no torneamento do alumínio

Embora não esteja bem definido o comportamento da velocidade de cisalhamento em termos da variação do ângulo de saída da ferramenta, é possível notar que ela é fortemente influenciada pelo aumento do avanço, ou seja, à medida que aumentamos o avanço ocorrerá um aumento na velocidade de cisalhamento.

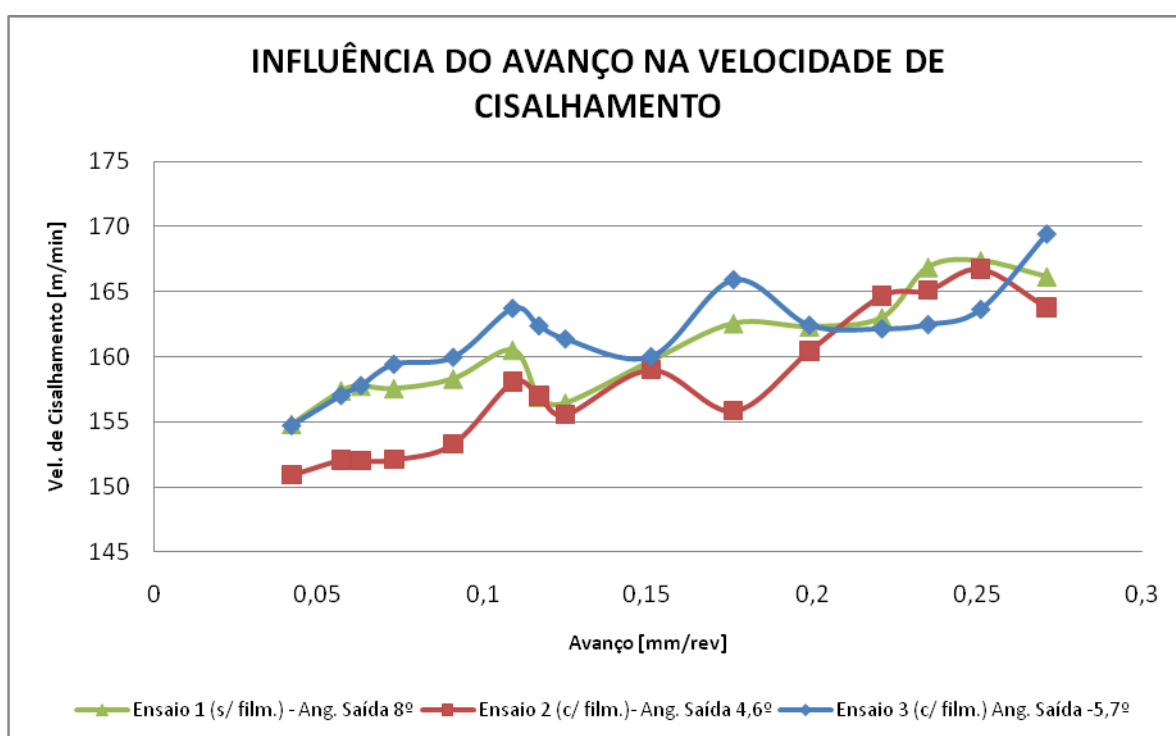


Figura 45 – Influência do avanço na velocidade de cisalhamento no torneamento do alumínio

Através da análise das imagens geradas nos ensaios filmados, foram medidos, seguindo o procedimento descrito no capítulo anterior, o raio de curvatura do cavaco seguindo a variação de avanço proposta no planejamento dos ensaios.

A medida que aumentamos o avanço percebemos uma queda gradual no raio de curvatura natural do cavaco. Os valores do ensaio com ferramenta de corte com ângulo de saída de $4,6^\circ$ encontram-se dispostos no gráfico da (figura 46).

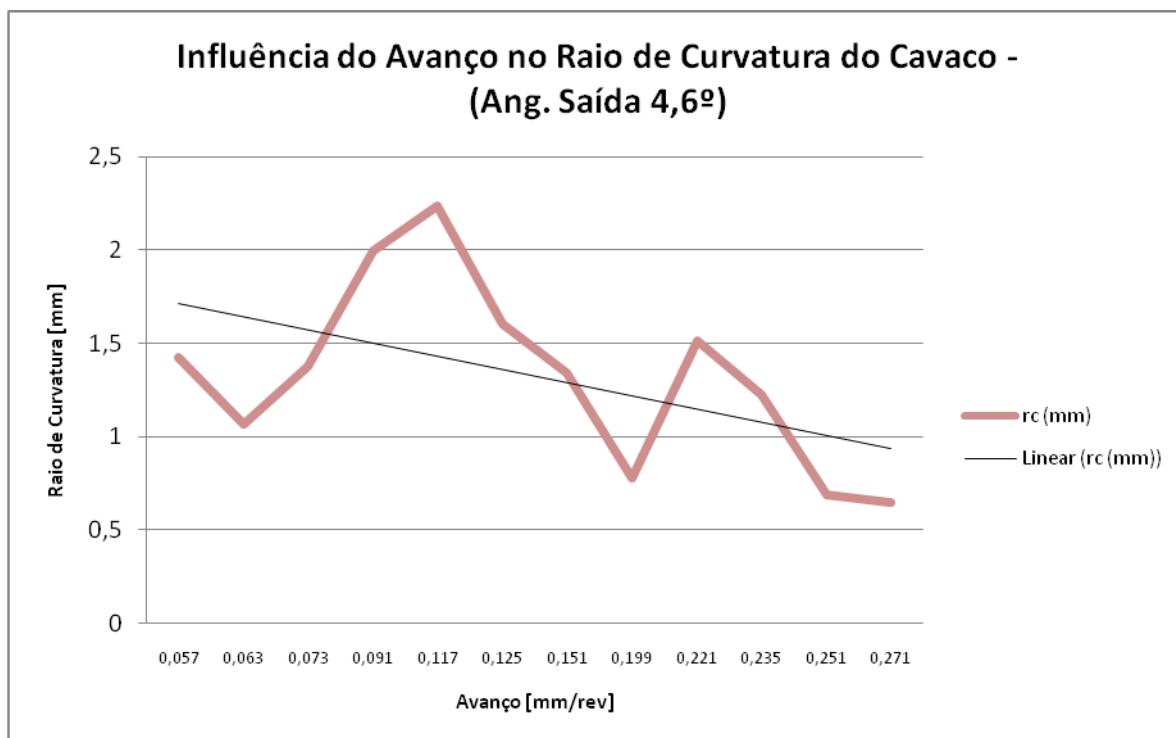


Figura 46 – Influência do Avanço no Raio de Curvatura do Cavaco (Ang Saída $4,6^\circ$)

Apesar do comportamento do raio de curvatura poder ser analisado a partir de inserção de uma linha de tendência de comportamento linear, fica nítido através da visualização do gráfico dos valores experimentais que fatores externos influenciaram nos resultados.

Foram levantados alguns pontos que influenciaram nos resultados do ensaio em termos do raio de curvatura e espessura do cavaco. Por se tratar de um experimento onde vários equipamentos são adaptados, e assim formando um conjunto onde cada equipamento terá um papel bem definido, o desempenho individual e a interação entre eles devem ser minuciosamente controlados afim de que os resultados não sejam influenciados. Com base nisso são listados os fatores de influência e o procedimento que deverá ser adotado para eliminá-los:

a) **Mau travamento da ferramenta no suporte:** O mau travamento do bedame no suporte da ferramenta (figura 47) faz com que ele se desloque para trás à medida que a operação de sangramento radial é realizada. De imediato já podemos concluir que isso interfere diretamente na velocidade de avanço que está sendo desenvolvida pela máquina ferramenta. Essa interferência se caracteriza como uma redução no avanço e por consequência influenciará na formação do raio de curvatura natural do cavaco. Para eliminar esse problema deve-se assegurar um bom travamento do parafuso, e isso pode ser feito através de uma chave adequada e, antes do travamento verificar se a face do bedame que deve estar toda em contato com o suporte realmente está.



Figura 47 – Fixação do Bedame no Suporte para Ferramenta

b) **Má fixação do suporte no porta-ferramentas:** O não travamento adequado do suporte no porta ferramentas (figura 48) faz com que o mesmo se desloque no desenvolvimento do sangramento radial, e o mesmo pode causar o desalinhamento da ponta da ferramenta com a contra ponta da máquina ferramenta. Isso pode fazer com que a premissa de perpendicularidade da aresta de corte ao plano de trabalho seja perdida, e obviamente, o mecanismo de formação do cavaco não ocorrerá no plano normal à direção de corte e a direção de avanço. O travamento deve ser realizado com uma chave específica para acionamento dos parafusos de fixação do porta ferramentas, e a alavanca é acionada com a mão, mas com todo o cuidado necessário para não haver risco a segurança.



Figura 48 – Fixação do suporte no porta ferramentas do torno

c) **Erro de posicionamento do suporte no porta ferramentas:** Apenas a boa fixação do suporte no porta ferramentas não vai garantir que o mecanismo de formação do cavaco ocorra no plano normal a direção de corte e direção de avanço. Além disso, é necessário assegurar que a aresta da ferramenta está alinhada, para isso basta aproximá-la da peça que será usinada e verificar visualmente se a mesma está atendendo as determinações teóricas.

d) **Erro de fabricação da aresta de corte da ferramenta (não é perpendicular ao plano de trabalho):** Para que a aresta seja perpendicular ao plano de trabalho não basta somente que haja todo o cuidado no alinhamento, mas também que essa perpendicularidade seja possível de ser obtida, e isso será possível se a aresta de corte for bem feita. A (figura 49) mostra uma inclinação da aresta de corte, o que torna impossível que seja desenvolvida a formação do cavaco sob condições de corte ortogonal.

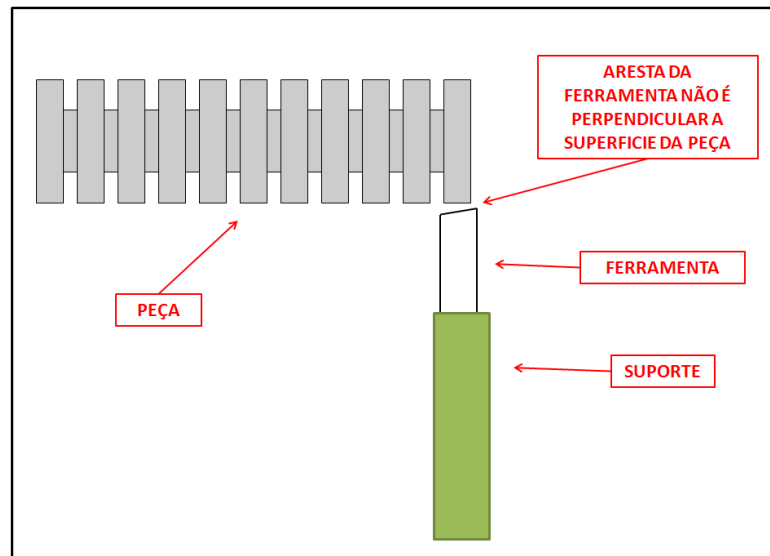


Figura 49 – Aresta de corte mal fabricada

e) **Desgaste da ponta da ferramenta:** Por se tratar de um sistema tribológico, com o decorrer dos ensaios haverá um desgaste da ponta e superfície de saída da ferramenta, o que sempre colocará os ensaios consecutivos em condições diferentes dos ensaios anteriores.

f) **Imperfeições na superfície de saída da ferramenta (inclinações laterais e superfície irregular):** Imperfeições na superfície de saída da ferramenta fazem com que o cavaco saia de forma lateral, impedindo a medição precisa na etapa de determinação do raio de curvatura com auxílio de software de medição de imagem, além de modificar o ângulo de saída da ferramenta, impossibilitando a determinação da influência efetiva dos parâmetros preestabelecidos da ferramenta, tendo em vista que são diferentes dos valores reais. Para eliminar essa influência é necessário um trabalho de fabricação de ferramenta precisa, assegurando que os dados geométricos serão obedecidos com um rigoroso critério de qualidade.

g) **Rugosidade não controlada da superfície de saída da ferramenta:** Como serão feitos vários ensaios com ferramentas com ângulos diferentes, deve-se ao menos conhecer a rugosidade da superfície de saída da ferramenta, pelo fato do processo de usinagem se caracterizar um sistema tribológico e por definição a rugosidade influenciará no deslizamento do cavaco na superfície de saída. Caso não seja possível a uniformização das rugosidades médias das superfícies de saída das

ferramentas que serão utilizadas, seria excelente que elas ao menos fossem conhecidas para que ao serem realizados os ensaios, nos resultados possam ser contempladas essas observações.

h) **Adesão do material ensaiado na superfície de saída da ferramenta:** Ao longo dos ensaios, o alumínio, que é um material extremamente dúctil, vai aderindo a superfície de saída da ferramenta, conforme a (figura 50). Essa imagem é gerada a partir de análise em MEV. O alumínio aderido vai encruando e formando uma espécie de “quebra-cavaco” na ferramenta, e fará com que o raio de curvatura seja menor, tendo em vista que o alumínio aderido à superfície de saída da ferramenta torna-se uma restrição a passagem do cavaco.

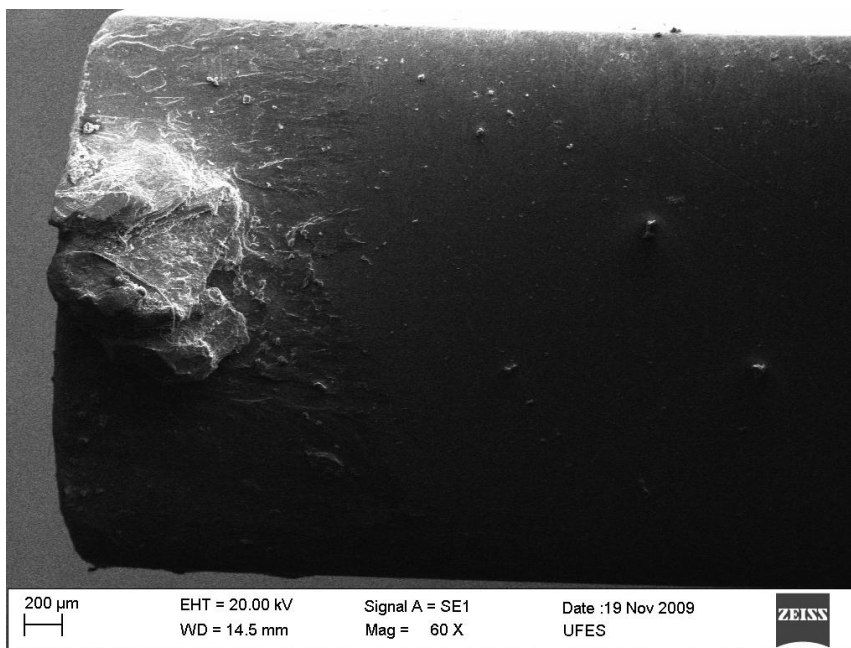


Figura 50 – Topografia da Superfície de Saída da Ferramenta

A (figura 51) é uma fotografia de fases também feita através de MEV que diferencia os materiais através de escala de cinza que estão presentes na superfície de saída da ferramenta.

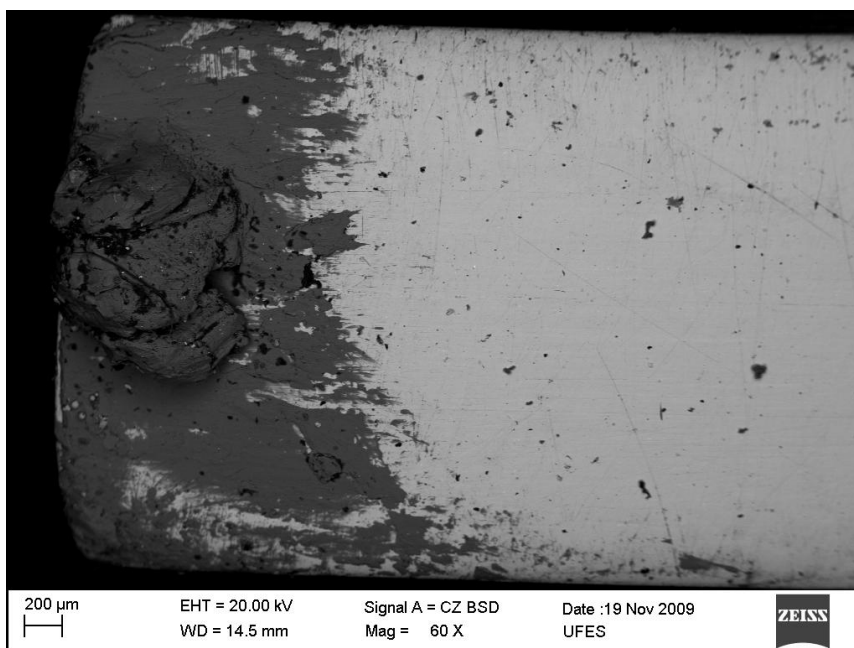


Figura 51 – Imagem de Fases na Superfície de Saída da Ferramenta

A (figura 52) nos permite diferenciar, de uma forma geral, o alumínio (cinza escuro) do aço rápido da ferramenta de corte (cinza claro). Além de formar um aglomerado de material aderido, o alumínio se adere ao longo de toda a ponta da ferramenta, o que modifica, obviamente, o atrito e o comportamento do deslizamento do cavaco na interface com superfície de saída da ferramenta. Isso é comprovado também a partir de uma análise química realizada no MEV nos pontos marcados (quadro 7, 8 e 9).

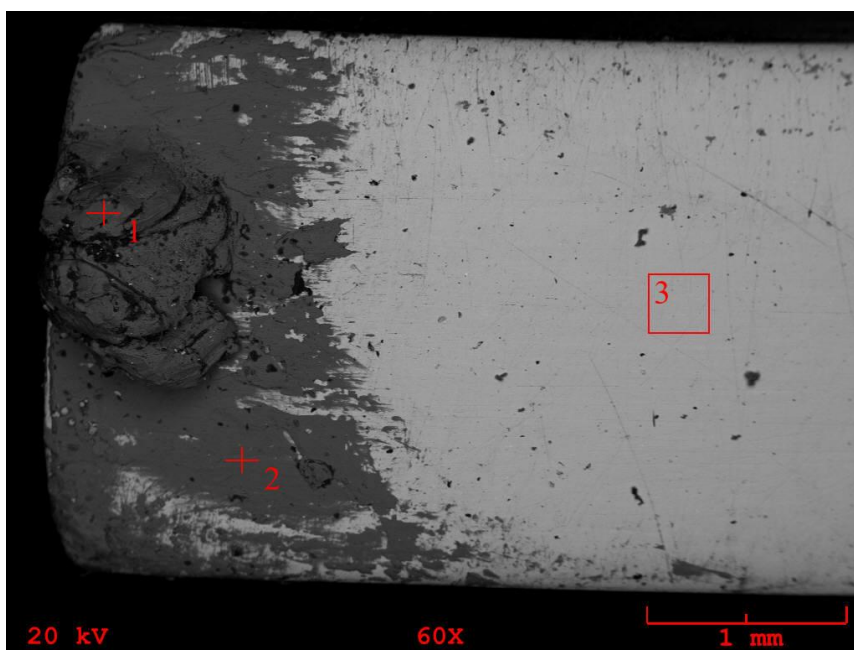


Figura 52 – Pontos de Análise da Composição Química

Mg (%)	Al (%)	Si (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)
1.362	97.204	0.330	0.286	0.521	0.297

Quadro 7 – Ponto 1 analisado no MEV

Mg (%)	Al (%)	Si (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)
1,754	96,837	0,113	0,212	0,936	0,147

Quadro 8 – Ponto 2 analisado no MEV

C (%)	V (%)	Cr (%)	Fe (%)	Co (%)	Mo (%)	W (%)
3,337	0,637	4,895	83,638	1,795	1,891	3,807

Quadro 9 – Ponto 3 analisado no MEV

i) **Danos mecânicos na peça, especificamente na superfície que será usinada:** Os danos mecânicos (figura 53) fazem com que o material antes de ser ensaio já tenha sofrido deformações. No processo de formação do cavaco, as deformações vão surgindo a partir da entrada da ferramenta na peça. Pelo fato da região com danos já ter sofrido uma quantidade significativa de deformação, logo é esperado que ela alcance a deformação necessária para a quebra do cavaco mais rapidamente do que as demais regiões da peça. O que não torna o material uniforme em termos de deformação necessária para a formação do cavaco, e naturalmente do raio de curvatura.



Figura 53 – Danos Mecânicos na Peça

j) **Posicionamento da ferramenta na preparação para execução do ensaio:** O alinhamento é necessário para que apenas a aresta de corte tenha contato com a superfície da peça, e o processo de formação de cavaco se desenvolva o mais próximo possível das premissas teóricas (figura 54).

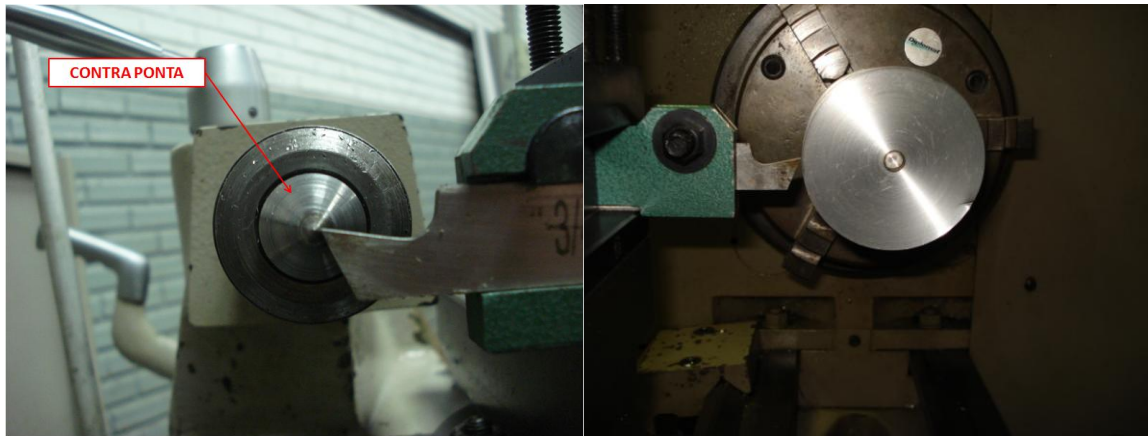


Figura 54 – Alinhamento da Peça com a Contra Ponta e Posicionamento para Ensaio

l) **Erro de posicionamento da peça no sistema de fixação do torno e Mau travamento da peça no sistema de fixação do torno:** Ambos os erros causam o desbalanceamento da peça, o que faz com que a ferramenta ao desenvolver a operação de sangramento radial não tenha uma espessura de corte contínua, e por consequência a espessura do cavaco, que é utilizada em análise de grau de recalque, também sofre total influência (Figura 55).

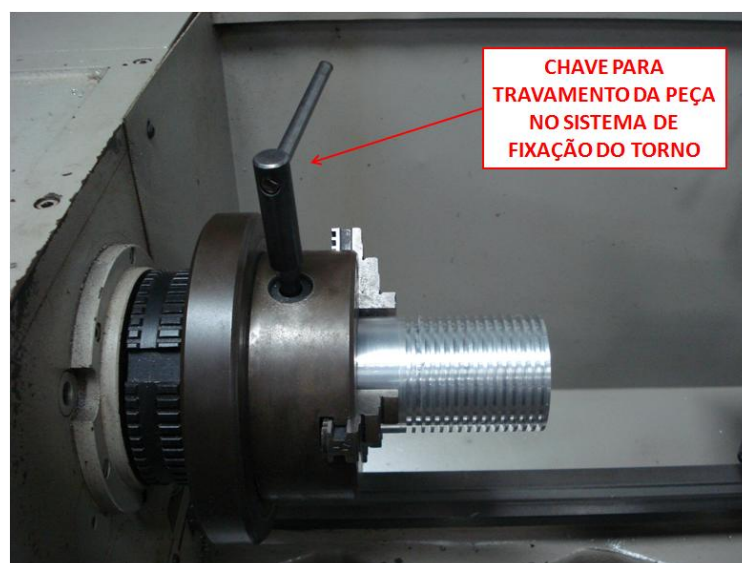


Figura 55 – Fixação adequada da peça no sistema de fixação do torno

m) **Vibração e Imprecisão da máquina ferramenta:** O tempo de uso do equipamento faz com que perca sua rigidez, e assim influenciará na formação do cavaco, tanto em termos de vibração que é transmitida para a ferramenta e para a peça, quanto em termos de precisão na rotação e avanço desenvolvidos. A vibração pode promover a quebra do cavaco, antes que seja possível fazer uma avaliação precisa.

n) **Desalinhamento da câmera:** Com o desalinhamento da câmera a imagem não é captada no perfil do corte ortogonal, ou seja, a imagem não é paralela ao plano de trabalho. Isso gera imagens captadas com determinadas inclinações, o que dificultará a análise futura para determinação do raio de curvatura.

Atento a todas as influências possíveis no ensaio, foi realizado o segundo ensaio com filmagem (Ensaio 3 c/filmagem) e analisada as imagens geradas. A medição dos raios de curvatura dos cavacos para os diferentes avanços desenvolvidos geraram o gráfico da (figura 56).

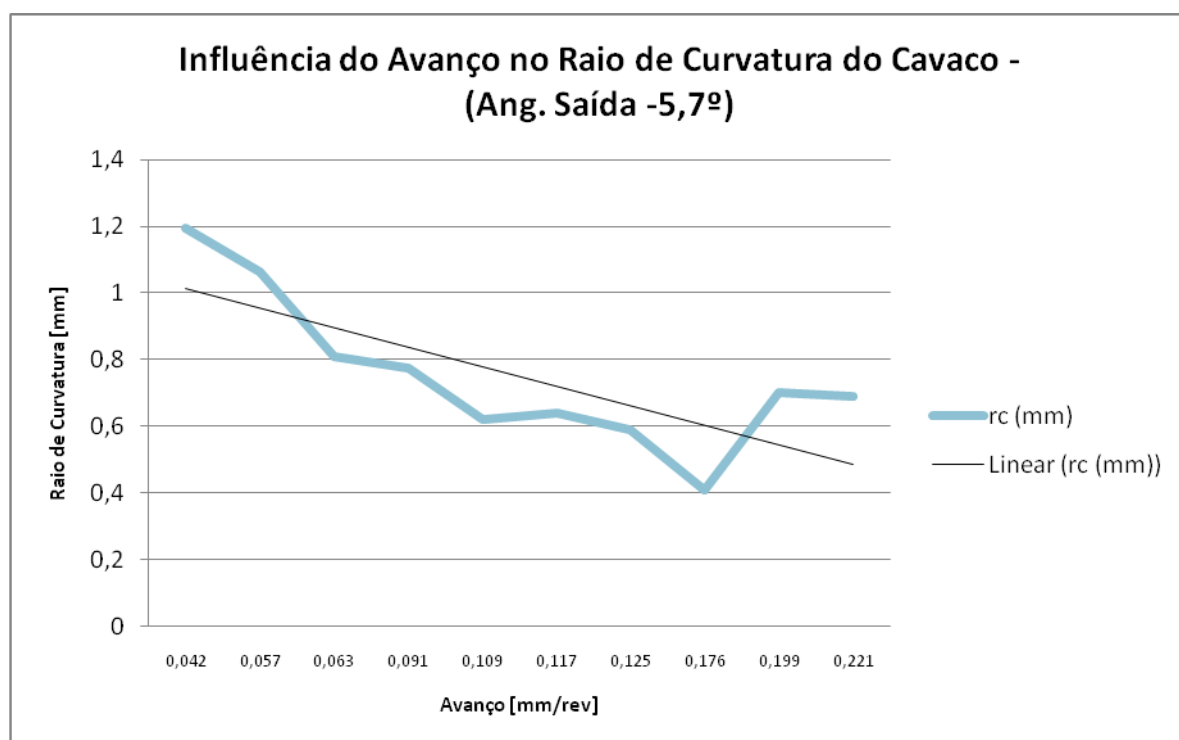


Figura 56 – Influência do Avanço no Raio de Curvatura do Cavaco (Ang Saída -5,7°)

Semelhantemente ao primeiro ensaio com filmagem (Ensaio 2), nota-se que o aumento do avanço causa a redução do raio de curvatura. Comparando os dois gráficos, o ensaio com ângulo de saída negativo (Ensaio 3 Ang. Saída $-5,7^\circ$), encontra-se deslocado para baixo em relação ao gráfico do ensaio com ângulo de saída de $4,6^\circ$. Embora não seja possível afirmar efetivamente a influência do ângulo de saída no raio de curvatura do cavaco por falta de mais valores experimentais, aparentemente, a diminuição do ângulo de saída causa também a redução do raio de curvatura do cavaco.

A menor espessura do cavaco permite que tenham uma maior flexibilidade, e, portanto, mais difíceis de serem quebrados. Ao passar pelas regiões de cisalhamento primário e secundário em seu processo de formação, os cavacos sofrem deformações intensas, e após deixarem a superfície de saída da ferramenta necessitam de uma deformação crítica para se fraturarem. A deformação que o cavaco vai sofrer nesse estágio é diretamente proporcional a h'/rc , onde rc é o raio de curvatura. (MACHADO; SILVA, 2004) Logo concluímos que quanto maior a relação h'/rc , maior a capacidade de quebrar cavaco.

O avanço é o parâmetro que mais influencia na forma do cavaco. (MACHADO; SILVA, 2004) Notamos nos gráficos das (figuras 46 e 56), que o aumento do avanço reduz o raio de curvatura do cavaco e também aumenta a espessura do cavaco. Por consequência haverá um aumento na relação h'/rc e logo haverá uma maior capacidade de quebrar cavaco.

Para ambos os ensaios onde foram realizadas filmagens, possibilitando a medição do raio de curvatura do cavaco, foram analisadas o comportamento da relação h'/rc com o aumento do cavaco, e foram gerados os gráficos das (figuras 57 e 58).

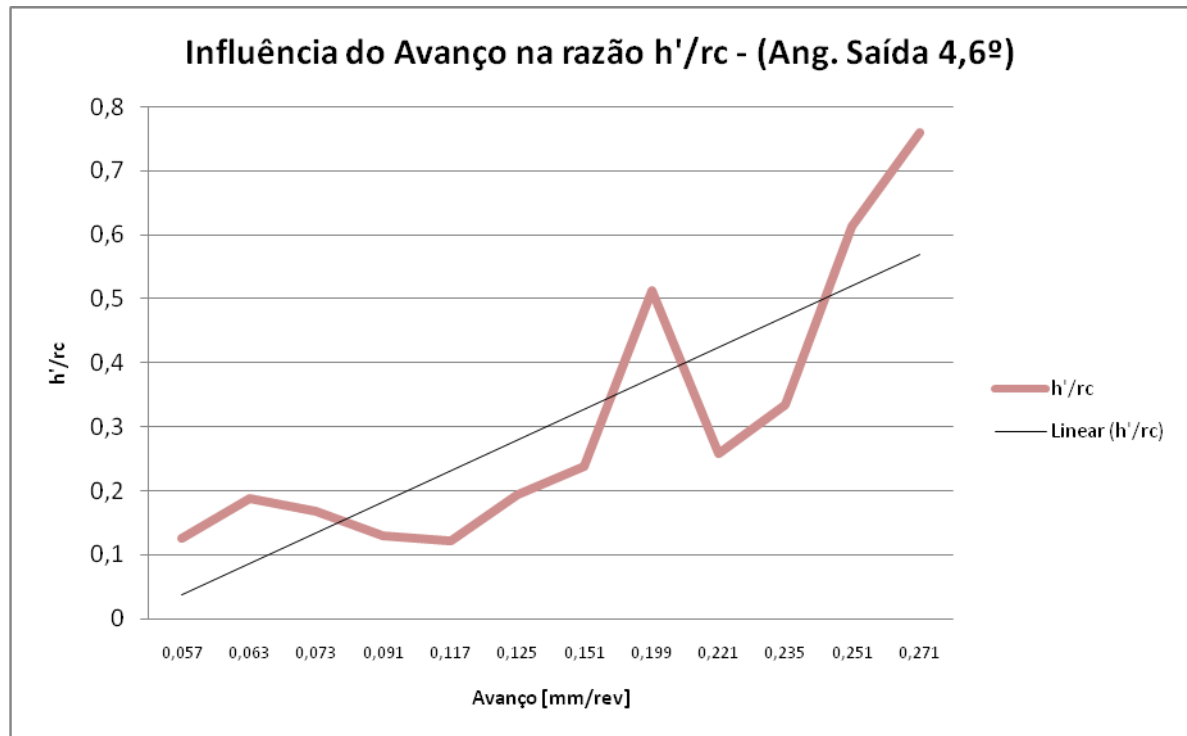


Figura 57 – Influência do avanço na razão h'/rc para ensaio com ferramenta com ângulo de saída de $4,6^\circ$

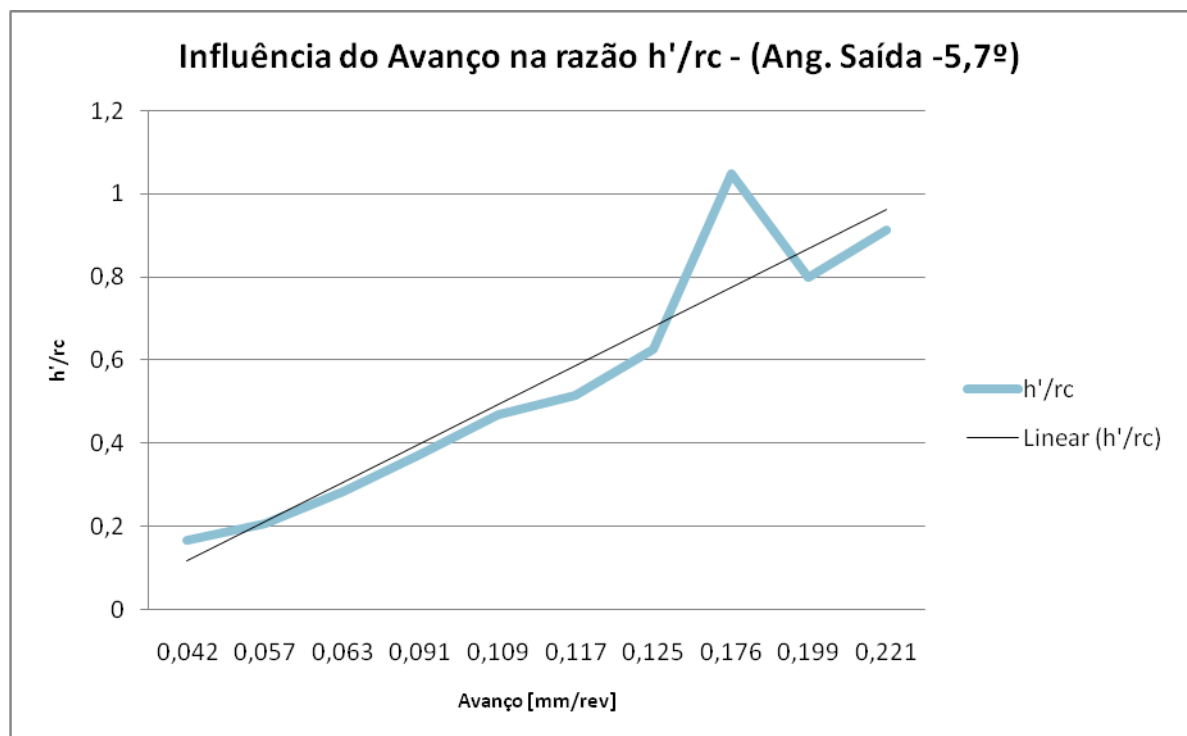


Figura 58 – Influência do avanço na razão h'/rc para ensaio com ferramenta com ângulo de saída de $-5,7^\circ$

Embora essa capacidade de quebrar o cavaco tenha aumentado com o aumento do avanço, dos cavacos gerados em todos os ensaios, todos eles foram classificados como contínuos, tendo em vista a alta ductilidade do alumínio.

Foram analisados em MEV os cavacos gerados nos ensaios de avanço de 0,042 e 0,221 mm/rev para ângulo de saída de $4,6^\circ$ (Figura 59 e Figura 60) e para ângulo de saída de $-5,7^\circ$ (Figura 59 e Figura 60).

É possível visualizar em todos os cavacos o escorregamento das lamelas, como resultado do processo de cisalhamento no plano primário. Embora esse resultado não seja unicamente fruto do escorregamento das lamelas individualmente, e deve ser considerado o efeito do atrito e o cisalhamento dentro do material. (MACHADO E SILVA, 2004)

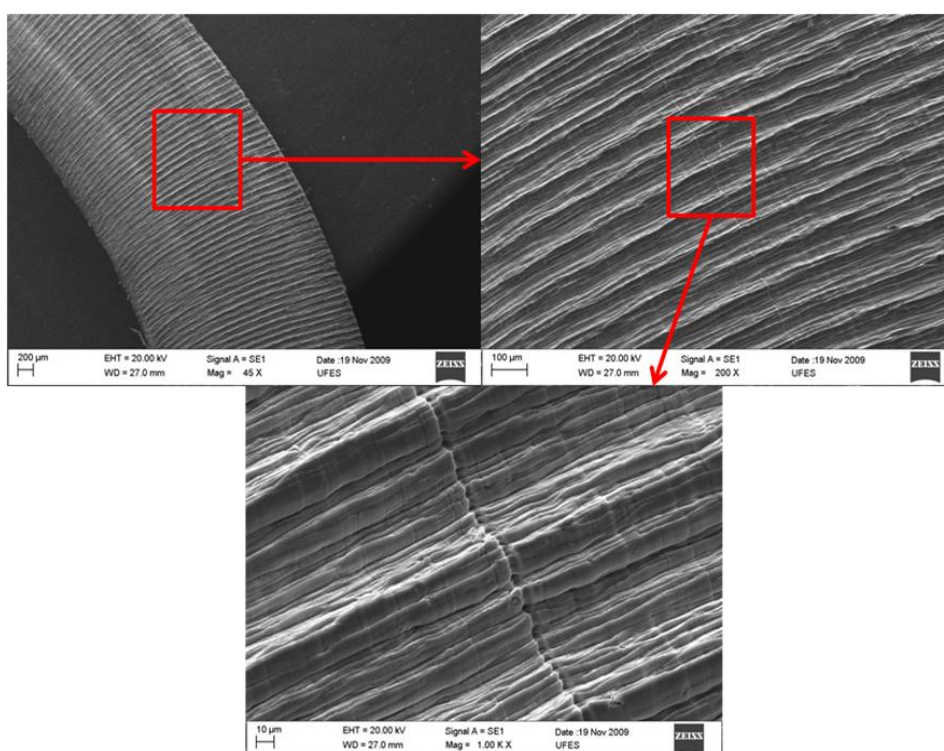


Figura 59 – Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de $4,6^\circ$ e avanço de 0,042 mm/rev.

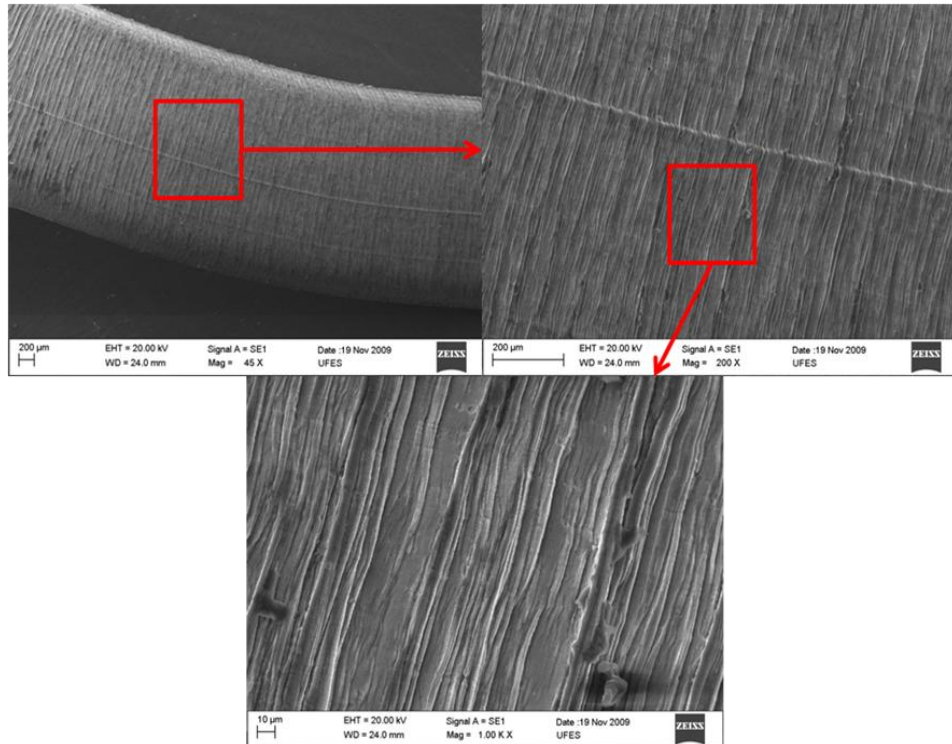


Figura 60 – Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de $4,6^\circ$ e avanço de 0,221 mm/rev.

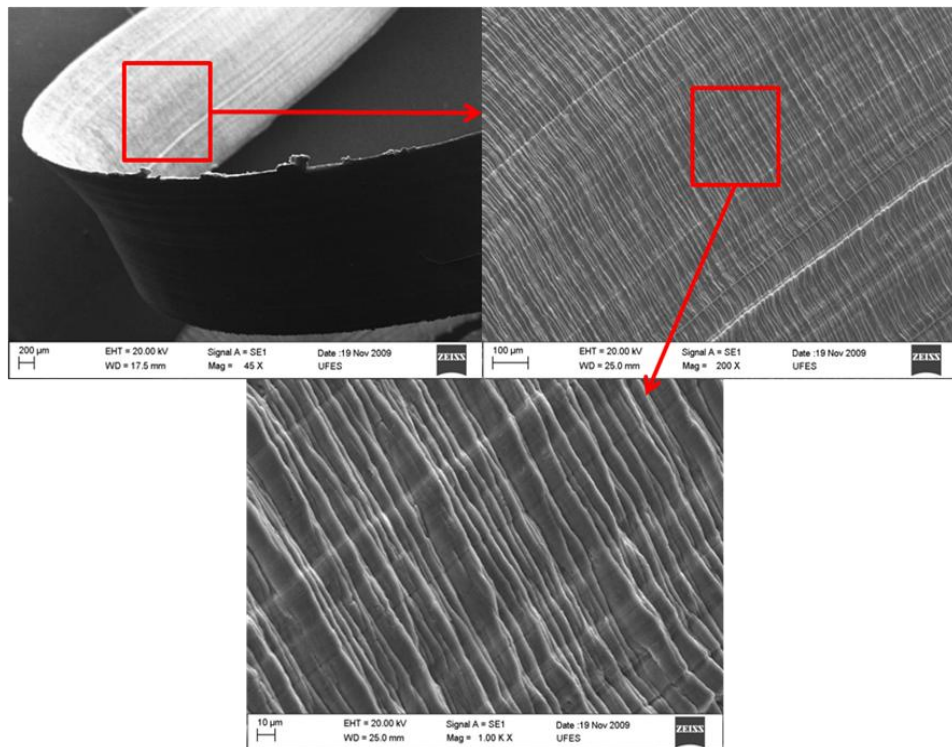


Figura 61 – Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de $-5,7^\circ$ e avanço de 0,042 mm/rev.

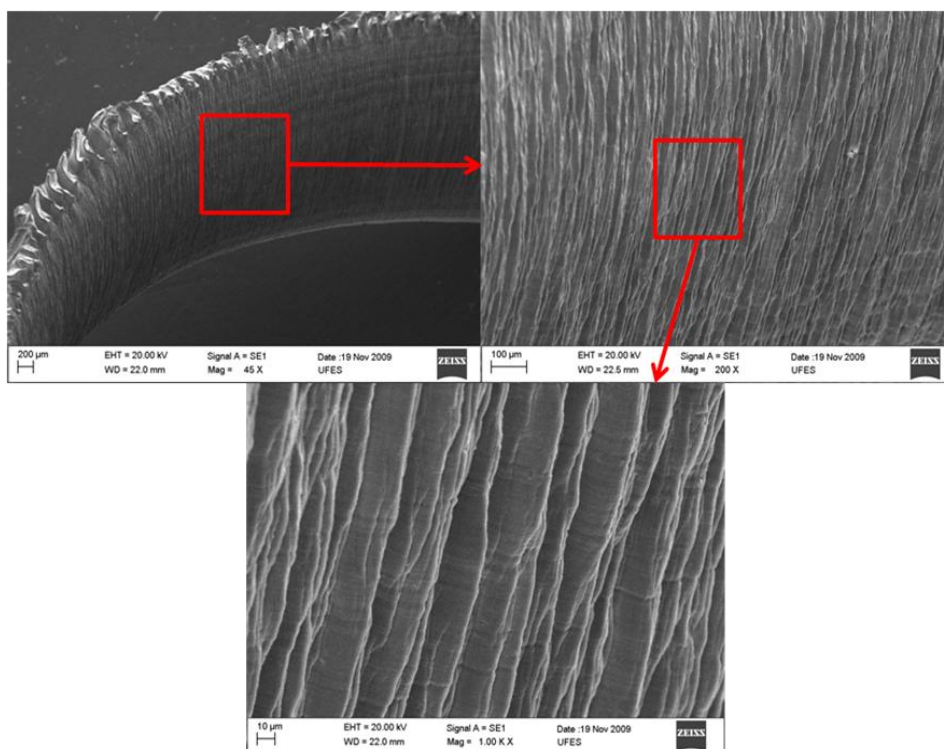


Figura 62 – Fotos em MEV dos cavacos gerados no torneamento com ângulo de saída de $-5,7^\circ$ e avanço de 0,221 mm/rev.

Foi verificado que nos ensaios onde a superfície e ponta da ferramenta apresentavam determinado desgaste ou defeitos de fabricação, essas falhas eram passadas para o cavaco, ficando evidenciadas através da marcação diferenciada no ponto ou em determinada frequência na superfície interna do cavaco.

Segundo Trent e Wright (2000), é possível verificar através do comportamento das lamelas verificadas nas figuras 59, 60, 61 e 62 a presença de desgaste na ferramenta de corte, e isso pode ser relacionado com o acabamento da peça que está sendo usinada.

5 CONCLUSÕES

A análise da formação do cavaco no torneamento do alumínio nos permitiu de fato comprovar os problemas que são causados na geração de cavacos em forma de fita, principalmente o fato de possuírem baixa densidade efetiva, isto é, ocupam muito espaço, e o fato de se enrolarem em torno da peça, o que pode gerar um risco ao operador e criar uma superfície não atrativa podendo causar danos a ferramenta.

De fato o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento são bons indicadores da quantidade de deformação que ocorre no plano de cisalhamento primário.

O aumento do avanço faz com que haja uma redução no grau de recalque e, por consequência o aumento no ângulo de cisalhamento, e aumento na velocidade de saída do cavaco.

A diminuição do ângulo de saída da ferramenta promove o aumento do grau de recalque, e consequente diminuição do ângulo de cisalhamento, e uma redução na velocidade de saída do cavaco.

A metodologia proposta para medição do raio de curvatura do cavaco de fato é efetiva, porém sujeita a diversas interferências externas que podem influenciar os resultados. Para isso é necessário tomar todos os cuidados listados, para que o ensaio seja realizado com sucesso.

As inspeções realizadas com auxílio de MEV permitiram visualizar a adesão do alumínio na superfície de saída da ferramenta.

Em termos de influência do raio de curvatura do cavaco, foi possível verificar que o aumento do avanço causa a redução desse parâmetro. Embora não tenha sido realizados ensaios com uma variação grande de ângulos de saída, permitindo caracterizar a influência desse parâmetro no raio de curvatura, foi possível verificar nos ensaios realizados que a diminuição do ângulo de saída da ferramenta também gera a redução do raio de curvatura.

Não foi gerado qualquer tipo de cavaco diferente do contínuo, porém, foi possível analisar a razão h'/rc e o seu aumento à medida que aumentamos o avanço nas operações de corte.

A visualização em MEV permitiu a análise da influência das imperfeições da ferramenta na superfície interior do cavaco. Embora essa análise tenha sido feita apenas de forma prévia, é sugerida para que seja objeto de estudo em trabalhos futuros.

6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Investigar a influência de outros parâmetros no raio de curvatura do cavaco, tais como, espessura de corte, velocidade de corte e uma maior variação de ângulo de saída da ferramenta.

Utilizar torno CNC (Comando Numérico Computadorizado) que permite operações com velocidade de corte constante, tendo em vista que em tornos convencionais a velocidade de corte varia à medida que a ferramenta avança na peça nos processos de sangramento radial, já que a velocidade de corte é dependente do diâmetro da peça.

Utilizar a metodologia proposta para avaliar a formação de cavaco de outros materiais, tais como Aço 1020, 1045, 4140 e 4340 que têm grande aplicabilidade no setor metal mecânico.

Com o auxílio de MEV investigar a deformação do cavaco, e relacioná-la com os parâmetros de corte desenvolvidos.

Seguir toda a verificação de fatores de influência dos ensaios, afim de que os resultados sejam validados.

Realizar os ensaios em quantidade maior de material, e assim, repetir as medições e filmagens para o ensaio com os mesmos parâmetros.

Utilizar maior quantidade de refletores para que seja possível uma maior taxa de aquisição de imagens pela câmera de alta velocidade.

7 REFERÊNCIAS

- 1 **Alumínio**. Disponível em:<
http://www.enq.ufrgs.br/cursos/index.php?dir=grad/MatCon/Aluminio/&file=Aluminio_Resumo.doc>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **O Alumínio**. Disponível em: <
<http://www.abal.org.br/aluminio/introducao.asp>>. Acesso em: 16 nov. 2009.
- 3 ASM HANDBOOK. **Machining**. 2 nd Printing. Vol. 16, 1995.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**:
Processos Mecânicos de Usinagem. Rio de Janeiro, 1971.
- 5 CIMM - Centro de Informação Metal Mecânico. **Elementos da Ferramenta**.
Disponível em: <
http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/3566>. Acesso em: 22
de nov. de 2009.
- 6 CIMM - Centro de Informação Metal Mecânico. **Fatores que Influenciam os
diferentes tipos e formas de cavaco** . Disponível em: <
http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/3650>. Acesso em: 22
de nov. de 2009.
- 7 CHILDS, T. et al. **Metal Machining**: Theory and Applications. London, 2000.
- 8 DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem
dos materiais**. 5.ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- 9 DIRECTINDUSTRY. **[Sem título]**. Disponível em:
<http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/turning-tool-39478.jpg>.
Acesso em: 17 nov. 2009.
- 10 DEPARTAMENTO de Engenharia de Produção da Universidade Federal de
Juiz de Fora. **Processos Produtivos em Engenharia de Produção**.
Disponível em: <
[http://www.engprod.ufjf.br/processos/USINAGEM/TORNEAMENTO_arquivos/i
mage048.jpg](http://www.engprod.ufjf.br/processos/USINAGEM/TORNEAMENTO_arquivos/image048.jpg)>. Acesso em: 17 nov. 2009.

- 11 FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1970.
- 12 MACHADO, Á., R. **Domar cavacos: tarefa difícil**. CIMM - Centro de Informação Metal Mecânico, 2007. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/2332-domar-cavacos-tarefa-difcil>. Acesso em: 25 de Ago. de 2009.
- 13 MACHADO, Á. R.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Metais**. 8ª Versão. Uberlândia, Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- 14 _____. _____. São Paulo: Ed. Blücher, 2009.
- 15 STOETERAU, R. L. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica. **Aula 03 – Cavacos**. 2007. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-03-U-2007-1-cavacos.pdf>>. Acesso em: 21 de jul. de 2009.
- 16 TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting**. 4. ed. Ed. Butterworth–Heinemann, 2000.
- 17 WILCOX, C.,D. et al. **IT.EXE**: free image processing and analysis program. Version 3.0. San Antonio: UTHSCSA, University of Texas Health Science Center, San Antonio, 2002. Disponível em: <<http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>>. Acesso em: 15 out. 2009.

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

ANEXO D

ANEXO E

ANEXO F