

Jonathan Felipe Camargo

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE CAVACOS NO  
TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS COM EMPREGO  
DE UM SISTEMA DE INTERRUÇÃO SÚBITA DE CORTE  
(QSD)**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Camargo, Jonathan Felipe

Análise da formação de cavacos no torneamento de aços  
inoxidáveis com emprego de um sistema de interrupção súbita  
de corte (QSD) / Jonathan Felipe Camargo ; orientador,  
Rolf Bertrand Schroeter - Florianópolis, SC, 2016.  
135 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Aço inoxidável  
supermartensítico. 3. Aço inoxidável austenítico. 4. Formação  
do cavaco. 5. QSD. I. Schroeter, Rolf Bertrand. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Jonathan Felipe Camargo

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE CAVACOS NO  
TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS COM EMPREGO  
DE UM SISTEMA DE INTERRUÇÃO SÚBITA DE CORTE  
(QSD)**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 01 de Julho de 2016.

---

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado a todos que  
permaneceram ao meu lado.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Professor Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. pela orientação, apoio e confiança, meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pelo apoio e sugestões para a realização deste trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e do Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON) pela amizade e apoio.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON), Núcleo de pesquisa em materiais cerâmicos e compósitos (CERMAT), Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO) Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO), e Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM), por disponibilizar a infraestrutura e dar suporte necessário para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC), pela oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa de estudos.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo constante a alcançar meus sonhos, mesmo em momentos difíceis, meus sinceros agradecimentos.

A todos que permaneceram ao meu lado, e de alguma forma ajudaram, direta ou indiretamente, meu muito obrigado.





*A mente que se abre a uma nova ideia, jamais  
voltará ao seu tamanho original.*

(Albert Einstein)



## RESUMO

A demanda por materiais resistentes à corrosão, combinada a uma boa resistência mecânica, aumentou em diversas áreas da engenharia, como por exemplo a dos aços aplicados nas indústrias do petróleo e alimentícia, trazendo assim a necessidade de desenvolvimento de materiais com estas características. Entre os processos de fabricação, a usinagem assume um papel de suma importância para as empresas do ramo metal-mecânico, sendo a responsável por ao menos uma etapa na fabricação da maioria dos componentes nos mais diversos segmentos industriais. A cada novo aço desenvolvido faz-se necessário um estudo de usinabilidade objetivando fornecer dados característicos aos usuários para tornar o processo de usinagem mais econômico. Através do emprego de uma metodologia baseada na interrupção súbita de corte, e da observação e análise de raízes de cavaco, foi investigado o processo da formação do cavaco de um aço inoxidável austenítico e de um aço inoxidável supermartensítico no torneamento. Para isto, foi empregado um dispositivo para interrupção súbita do corte, conhecido como *Quick-stop device* (QSD), desenvolvido no LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão) e que possibilita a obtenção das raízes de cavaco dentro de uma grande variação de condições de corte. O dispositivo QSD utilizado remove a ferramenta da região de corte pelo impacto de uma massa na extremidade da ferramenta, em uma velocidade maior que a velocidade de corte. A energia de impacto da massa é fornecida por uma mola de compressão comprimida até um valor preestabelecido. O dispositivo QSD teve suas características técnicas avaliadas, com o objetivo de verificar as faixas de velocidades de corte, para as quais o dispositivo poderia ser empregado. Para tal foram avaliadas imagens obtidas por câmeras de alta velocidade, que permitem o registro da saída da ferramenta da zona de corte quando do disparo do QSD. As amostras das raízes de cavaco mostraram a existência de gume postiço para a velocidade de corte de 20 m/min. Para as velocidades de 120 e 220 m/min, para ambos os aços inoxidáveis avaliados, não foi verificada a formação de gume postiço. Através da análise das amostras de raízes de cavaco foi possível observar que a microdureza na região da raiz do cavaco diminuiu com o aumento da velocidade de corte e que o grau de recalque diminuiu com o aumento do avanço e da velocidade de corte. Verificou-se adicionalmente que com a diminuição da velocidade de corte ocorreu um aumento da zona de fluxo na região da face da ferramenta. Também foram avaliadas as formas dos cavacos formados.

**Palavras-chave:** Aços inoxidáveis. Torneamento. QSD. Índice de recalque. Formação do cavaco. Zona de Fluxo.

## ABSTRACT

The demand for corrosion-resistant materials combined with a good mechanical resistance increased in various fields of engineering such as steels applied in the oil and food industries thus bringing the need for development of materials with these characteristics. Currently, along with other manufacturing processes, machining assumes on a role of paramount importance to companies in the metal-mechanic field, being responsible for the countless components manufacture of various industrial segments. For every new steel developed, however, it is necessary a study of its machinability to determine their manufacturing characteristics, in order to assist users in taking the most economical machining process decisions. Through the use of a methodology based on the sudden interruption of cut, and the observation and analysis of chip roots, the chip formation process of an austenitic stainless steel and a supermartensitic stainless steel was investigated during turning. To do this, was employed a device for sudden interruption of cut, commonly known as Quick-Stop Device (QSD), developed in the LMP (*Laboratório de Mecânica de Precisão* – Precision Mechanic Laboratory). That device allows to obtain the chip roots within a wide range of cutting conditions. The QSD available used is characterized by the use of energy stored by a compression spring to remove the cutting area of the tool at a greater speed than the cutting speed. Prior to the tests, the QSD had its technical characteristics evaluated. Application ranges were checked in terms of cutting speeds for which the device could be uses. For such measurements, the technique used was based on high-speed cameras, which allows the registration of the exit tool from the cutting area when the QSD was triggered. Samples of the chip roots shows the existence of build-up edge for cutting speed of 20 m / min. While the speeds of 120 and 220 m / min for both evaluated stainless steel, it was not observed the formation of build-up edge. This work were also evaluated the shapes of chips formed during machining of the tested stainless steels. Through analysis of the samples was observed that the hardness at the root of the chip decreases with increasing cutting speed, and the chip compression decreases with increasing feed and cutting speed.

**Keywords:** Stainless steels. Turning. QSD. Chip compression. Chip formation. Flow Zone.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação dos aços inoxidáveis de acordo com a concentração de cromo e níquel.....	32
Figura 2.2 – Valores de tensão de tração e tensão de escoamento dos aços inoxidáveis.....	34
Figura 2.3 – Aços inoxidáveis martensíticos derivados do AISI 410 por meio de alteração da composição química e sua relação com outras famílias de aços.....	35
Figura 2.4 – Microestrutura de um aço inoxidável supermartensítico UNS S41426.....	36
Figura 2.5 – Principais aços inoxidáveis austeníticos e suas relações por meio da composição química.....	37
Figura 2.6 – Micrografias do aço inoxidável austenítico Fe-25Cr-20Ni.....	38
Figura 2.7 – Comparativo da usinabilidade dos aços inoxidáveis em porcentagem com relação ao aço de corte livre de baixo carbono.....	40
Figura 2.8 – Variação da dureza do material em função do calor.....	43
Figura 2.9 – Classificação dos materiais de ferramentas de corte.....	44
Figura 2.10 – Influências dos métodos de revestimento CVD e PVD sobre as tensões residuais do revestimento.....	46
Figura 2.11 – Desempenho de diferentes tipos de revestimentos PVD.....	47
Figura 2.12 – Características de uma ferramenta de tornear.....	48
Figura 2.13 – Influência da geometria da ferramenta nas características de usinagem.....	48
Figura 2.14 – Efeito do ângulo de saída sobre a força de corte.....	49
Figura 2.15 – Mecanismos de formação de cavaco: (a) proposto por Time; (b) proposto por Piispanen; (c) e (d) propostos por Merchant.....	51
Figura 2.16 – Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco (direita) e micrografia da região de formação do cavaco (esquerda).....	52
Figura 2.17 – Zona de aderência e escorregamento.....	54
Figura 2.18 – Representação do gume postiço.....	55
Figura 2.19 – Exemplos da presença do gume postiço durante a usinagem.....	56
Figura 2.20 – Cavaco segmentado.....	58
Figura 2.21 – Classificação dos cavacos.....	58
Figura 2.22 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.....	59
Figura 2.23 – Cavacos de um aço inoxidável austenítico EM 14404 usados com $v_c$ de 100 m/min.....	60
Figura 2.24 – Forma dos cavacos de um aço inoxidável martensítico usado com (a) $v_c = 100$ m/min, $f = 0,09$ mm; (b) $v_c = 130$ m/min, $f = 0,16$ mm; (c) $v_c = 100$ m/min, $f = 0,28$ mm.....	60
Figura 2.25 – Variação do tipo de cavaco de um aço inoxidável supermartensítico S41426 em função do avanço usinado com $v_c = 150$ m/min.....	61
Figura 2.26 – Formação do cavaco.....	62
Figura 2.27 – Relação entre grau de recalque e ângulo de cisalhamento ao usinar um aço SAE 1035 ( $v_c = 100$ m/min; $a_p = 0,3$ mm; $f = 0,2$ mm).....	63

Figura 2.28 – Relação do grau de recalque com ângulo de saída em uma liga de chumbo ( $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,3$ mm). .....	63
Figura 2.29 – Relação da velocidade de corte com o grau de recalque em uma liga de chumbo ( $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,3$ mm). .....	64
Figura 2.30 – Variação do grau de recalque em função da velocidade de corte	64
Figura 2.31 – Relação entre a velocidade de corte e o fator de recalque ao usinar um aço AISI 1040. ....	65
Figura 2.32 – Relação entre o avanço e o fator de recalque ao usinar um aço AISI 1040. ....	65
Figura 2.33 – Relação entre a profundidade de corte e o grau de recalque. ....	66
Figura 2.34 – Relação entre a profundidade de corte e o grau de recalque ao usinar um aço AISI 1040. ....	67
Figura 2.35 – Zona de fluxo na interface cavaco ferramenta. ....	67
Figura 2.36 – Modelo de deformação na zona de fluxo. ....	68
Figura 2.37 – Micrografias da zona de fluxo. ....	69
Figura 2.38 – Representação mostrando (a) modelo de ruptura do pino por explosão, (b) modelo de ruptura do pino por acionamento mecânico. ....	70
Figura 2.39 – Diagrama mostrando (a) modelo de ação do <i>Quick-Stop Device</i> , (b) - (e) situações que podem ocorrer nos testes. ....	71
Figura 3.1 – Visão geral dos ensaios deste trabalho. ....	73
Figura 3.2 – Dispositivo QSD montado no Torno Romi I-45. ....	76
Figura 3.3 – (a) Ferramenta de corte; (b) Suporte da ferramenta. ....	77
Figura 3.4 – Dispositivo QSD desenvolvido por Lucas. ....	78
Figura 3.5 – Mola tensionada (a), momento do impacto do martelo no suporte (b), ferramenta fora da zona de corte (c). ....	79
Figura 3.6 – Mola tensionada no dispositivo (a), vista em corte da mola tensionada (b), retirada da barra roscada e rolamento (c), retirada do gatilho e massa disparada (d), ruptura do pino de cisalhamento e saída da ferramenta da zona de formação do cavaco (e), dispositivo após ser disparado (f). ....	80
Figura 3.7 – Esboço ilustrativo do pino utilizado. ....	82
Figura 3.8 – Sequência de imagens durante a retração da ferramenta, com diferença de 1 ms; 0 ms (a); 1 ms (b); 2 ms (c); 3 ms (d); 4 ms (e); 5 ms (f); ...	83
Figura 3.9 – Velocidade de saída da ferramenta no dispositivo QSD sem usinagem. ....	84
Figura 3.10 – Montagem experimental do QSD. ....	85
Figura 3.11 – Separação das amostras de raiz de cavaco dos corpos de prova para as análises. ....	86
Figura 3.12 – Procedimento de análise da raiz do cavaco. ....	86
Figura 3.13 – Regiões de medição das microdurezas nas raízes de cavaco. ....	88
Figura 4.1 – Microestrutura dos materiais em estudo. ....	89
Figura 4.2 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S30400 obtida com $v_c = 20$ m/min, $a_p = 2$ mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,1$ mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,2$ mm; (e) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,1$ mm; (f) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,2$ mm. ....	91
Figura 4.3 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 1 da Figura 4.2 (b). ....	92



Figura 4.4 –Espectro obtido por EDS no ponto EDS 2 da Figura 4.2 (d). .....	93
Figura 4.5 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S30400 obtida com $v_c = 120$ m/min, $a_p = 2$ mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,1$ mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,2$ mm; (e) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,1$ mm; (f) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,2$ mm. ....	94
Figura 4.6 –Espectro obtido por EDS no ponto EDS 4 da Figura 4.5 (c). .....	95
Figura 4.7 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S30400 obtida com $v_c = 220$ m/min, $a_p = 2$ mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,1$ mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,2$ mm; (e) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,1$ mm; (f) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,2$ mm. ....	96
Figura 4.8 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 6 da Figura 4.7 (d). .....	97
Figura 4.9 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S41426 obtida com $v_c = 20$ m/min, $a_p = 2$ mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,1$ mm; (c) e (d) micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco com $f = 0,1$ mm; (e) e (f) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,2$ mm; (g) e (h) micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco com $f = 0,2$ mm. ....	98
Figura 4.10 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 8 da Figura 4.9 (b). .....	99
Figura 4.11 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 10 da Figura 4.9 (f). ....	99
Figura 4.12 –Imagem da raiz do cavaco do UNS S41426 obtida com $v_c = 120$ m/min, $a_p = 2$ mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,1$ mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,2$ mm; (e) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,1$ mm; (f) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,2$ mm. ....	100
Figura 4.13 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S41426 obtida com $v_c = 220$ m/min, $a_p = 2$ mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,1$ mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com $f = 0,2$ mm; (e) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,1$ mm; (f) micrografia da seção longitudinal com $f = 0,2$ mm. ....	102
Figura 4.14 – Microdureza do UNS S30400 em diferentes condições de corte. ....	103
Figura 4.15 – Microdureza do UNS S41426 em diferentes condições de corte. ....	104
Figura 4.16 – Dimensão da zona de fluxo. ....	105
Figura 4.17 – Cavacos coletados após a usinagem do UNS S30400. ....	107
Figura 4.18 – Cavacos coletados após a usinagem do UNS S41426. ....	108
Figura 4.19 – Espessura do cavaco em função da velocidade de corte. ....	109
Figura 4.20 – Grau de recalque em função da velocidade de corte, avanço e material usinado. ....	112
Figura 4.21 – Variação do ângulo de cisalhamento em função da velocidade de corte, do avanço e do material usinado. ....	113



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades de cada grupo de aços inoxidáveis. ....	33
Tabela 2.2 – Índice de usinabilidade de diferentes aços inoxidáveis. ....	39
Tabela 2.3 – Classificação dos materiais de ferramentas de corte. ....	45
Tabela 2.4 – Parâmetros usinagem utilizados em pesquisas no torneamento de aços inoxidáveis. ....	50
Tabela 2.5 – Tipos de cavacos. ....	57
Tabela 3.1 – Quantidade de material utilizado nos ensaios. ....	73
Tabela 3.2 – Composição química dos materiais. ....	74
Tabela 3.3 – Ensaio de tração. ....	75
Tabela 3.4 – Tabela das intensidades de compressão da mola no QSD (tamanho da mola sem compressão = 430 mm). ....	79
Tabela 3.5 – Condições utilizadas nos testes de QSD. ....	85
Tabela 3.6 – Reagentes e tempo de ataque da metalografia. ....	87
Tabela 4.1 – Teste de Hipótese do UNS S30400 para a variação de $v_c$ . ....	110
Tabela 4.2 – Teste de Hipótese do UNS S41426 para a variação de $v_c$ . ....	110
Tabela 4.3 – Teste de Hipótese da diferença da espessura do cavaco em função do material. ....	111



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBN	Nitreto de boro cúbico
CERMAT	Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos
CCC	Cúbica de corpo centrada
CFC	Cúbica de face centrada
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DIN	<i>Deutsche Institut für Normung</i>
EDS	Espectroscopia de raio X por dispersão em energia.
<i>et al</i>	Mais de dois autores
FAPESC	Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina
HB	<i>Hardness Brinell</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
LABCONF	Laboratório de conformação
LABMETRO	Laboratório de Metrologia e Automatização
LCM	Laboratório de Caracterização Microestrutural
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão UFSC
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
POSMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
QSD	<i>Quick-Stop device</i>
TCC	Tetragonal de corpo centrada
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USICON	Laboratório de Usinagem e Comando Numérico UFSC



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras maiúsculas

$Al_2O_3$	[-]	Óxido de alumínio
$AlTiCrN$	[-]	Nitreto de Cromo Titânio Alumínio
$E_{mola}$		Energia acumulada na mola
$E_{cinética}$		Energia cinética
HCl	[-]	Ácido clorídrico
$HNO_3$	[-]	Ácido nítrico
K	[N/m]	Constante elástica da mola
MnS	[-]	Sulfeto de manganês
NbC	[-]	Carboneto de Nióbio
$R_c$		Grau de recalque
TiAlN	[-]	Nitreto de titânio e alumínio
TiC	[-]	Carboneto de titânio
TaC	[-]	Carboneto de Tântalo
TiCN	[-]	Carbonitreto de titânio
TiN	[-]	Nitreto de titânio
WC	[-]	Carboneto de tungstênio

### Letras minúsculas

$a_p$	[mm]	Profundidade de corte
f	[mm]	Avanço
h	[mm]	Espessura de corte
$h_{ch}$	[mm]	Espessura do cavaco
$m_p$	[kg]	Massa de impacto
$m_{th}$	[kg]	Massa do suporte da ferramenta
rpm	[-]	Rotação por minuto
$r_\epsilon$	[mm]	Raio de quina da ferramenta
$v_c$	[m/min]	Velocidade de corte
$V_{mr}$	[m/min]	Velocidade media de retração
$v_p$	[m/s]	Velocidade da massa de impacto
$v_t$	[m/s]	Velocidade de retração da ferramenta
$v_{th}$	[m/s]	Velocidade do suporte da ferramenta

## Letras gregas

$\varepsilon$		Grau de deformação
$\varepsilon_r$	[graus]	Ângulo de ponta
$\phi$	[graus]	Ângulo de cisalhamento
$\alpha_o$	[graus]	Ângulo de incidência ortogonal
$\beta$	[graus]	Ângulo de cunha
$\gamma_o$	[graus]	Ângulo de saída ortogonal
$\lambda_s$	[graus]	Ângulo de inclinação ortogonal
$\chi_o$	[graus]	Ângulo de saída
$\kappa_r$	[graus]	Ângulo de direção do gume da ferramenta



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	29
<b>2 ESTADO DA ARTE</b> .....	31
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.....	31
2.1.1 Aços inoxidáveis supermartensíticos .....	34
2.1.3 Aços inoxidáveis austeníticos.....	37
2.2 USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS .....	38
2.2.1 Torneamento de aços inoxidáveis .....	41
2.2.2 Ferramentas de corte .....	42
2.2.3 Geometria da ferramenta .....	47
2.2.4 Parâmetros de Corte .....	50
2.3 MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAVACO .....	51
2.3.1 Interface cavaco-ferramenta .....	53
2.3.3 Tipos e Formas de cavaco .....	56
2.3.4 Grau de recalque do cavaco .....	61
2.3.5 Zona de Fluxo .....	67
2.4 <i>QUICK-STOP DEVICE</i> (QSD) .....	69
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	73
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ENSAIADOS .....	73
3.1.1 Análise da microestrutura .....	74
3.1.2 Ensaio de Dureza .....	75
3.1.3 Ensaio de Tração .....	75
3.2 TIPO DE OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO.....	76
3.3 MÁQUINA-FERRAMENTA .....	76
3.4 FERRAMENTA DE CORTE E PORTA FERRAMENTA .....	77
3.5 DISPOSITIVO QSD.....	77
3.5.1 Sistema de acionamento mecânico .....	78
3.5.2 Pino de cisalhamento.....	82
3.5.3 Determinação da velocidade de retração da ferramenta .....	83
3.6 ENSAIOS COM DISPOSITIVO QSD .....	84
3.6.1 Obtenção da raiz do cavaco.....	85
3.6.2 Análise das raízes do cavaco.....	86
3.6.3 Microestrutura da raiz do cavaco .....	87
3.6.4 Microdureza.....	87
3.6.5 Grau de recalque, ângulo de cisalhamento e zona de fluxo ...	88
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	89
4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	89
4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE QSD .....	90
4.2.1 Análise da raiz do cavaco na interface cavaco-ferramenta ...	90
4.2.2 Microdureza das raízes de cavaco .....	103

<b>4.2.3 Dimensões da zona de fluxo.....</b>	<b>105</b>
<b>4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS CAVACOS.....</b>	<b>106</b>
<b>4.3.1 Grau de recalque e ângulo de cisalhamento .....</b>	<b>111</b>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. ....</b>	<b>115</b>
<b>5.1. CONCLUSÕES.....</b>	<b>115</b>
<b>5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE A – Resultados das filmagens com a câmera de alta velocidade .....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE B – Resultados das medições de microdureza.....</b>	<b>133</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento dos aços inoxidáveis significou um amplo avanço no desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão em diversas áreas de engenharia, como na construção civil, automotiva, alimentícia, química e principalmente na área petrolífera, sendo esses aços de grande interesse para a engenharia.

A indústria petrolífera se destaca pela utilização dos aços inoxidáveis em refinarias devido ao seu ambiente extremamente agressivo. No Brasil, com a descoberta de novas reservas de petróleo no pré-sal, as indústrias metalúrgicas têm tido o desafio de desenvolver novos materiais que combinem a resistência à corrosão com a resistência mecânica. Dentre os grupos de aço inoxidáveis disponíveis os aços inoxidáveis austeníticos se destacam por possuírem uma boa resistência à corrosão, boa soldabilidade e elevada resistência mecânica. Os aços inoxidáveis supermartensíticos se destacam pela dureza elevada, exigindo maior esforço de corte em decorrência da presença da martensita e de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo [1].

Tão importante quanto as propriedades de desempenho (resistência mecânica, resistência à corrosão etc.), as propriedades de fabricação, como a usinabilidade e a soldabilidade, devem ser consideradas na seleção dos materiais. A indústria responsável pela transformação do material bruto em peças acabadas tem mostrado interesse em informações que levam a uma usinagem mais econômica. Conforme Walker [2] grande parte dos componentes da indústria é produzida através da usinagem. De acordo com Trent e Wright [3], os processos de usinagem são responsáveis por transformar em cavaco cerca de 10% de toda a produção de metais, e representam aproximadamente 15% do valor dos produtos fabricados nos países industrializados, sendo o processo de torneamento uma das operações mais utilizadas.

A usinabilidade, independentemente do processo de usinagem, é considerada difícil para os aços inoxidáveis. Sendo assim, entender como acontece a formação do cavaco e os impactos da usinagem na microdureza da subsuperfície na região de formação do cavaco destes materiais é de grande relevância, não só para o meio acadêmico, mas também para a indústria que processa este tipo de material. Isto decorre do fato de que a formação do cavaco está diretamente associada ao comportamento da força de usinagem necessária para realização do corte, vibrações durante a usinagem, acabamento superficial, quebra do cavaco, desgaste da ferramenta de corte e formação do gume postiço, entre outros aspectos.

Na usinagem, certas técnicas ajudam a entender os fenômenos que ocorrem na interface cavaco-ferramenta. Uma técnica importante nessa análise é o ensaio utilizando um dispositivo *Quick-Stop Device* (QSD), que permite analisar a raiz do cavaco. De acordo com Machado *et al.* [4], a maioria das teorias modernas disponíveis que fazem referência à interface cavaco-ferramenta derivam de estudos que fizeram o uso deste tipo de ensaio.

Neste trabalho adotou-se o método de interrupção súbita do processo de corte, empregando o dispositivo *Quick-Stop Device* (QSD) desenvolvido por Lucas [5] no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) para o estudo da raiz do cavaco dos aços inoxidáveis austenítico e supermartensítico na faixa de velocidades de corte de 20 à 220 m/min, avaliando a microestrutura, a microdureza da camada limite (região abaixo da superfície) e o ângulo de cisalhamento e o fator de recalque, além de classificar os cavacos provenientes dos ensaios quanto a sua classe e forma.

Foi necessário efetuar-se a manutenção corretiva do dispositivo QSD visto que a utilização anterior impôs solicitações severas aos elementos móveis deste dispositivo. O correto funcionamento do QSD é fundamental para conhecer e estudar o mecanismo de formação do cavaco na interface cavaco/ferramentas dos dois tipos de aços inoxidáveis. O trabalho é focado em contribuir para o entendimento dos fenômenos e mecanismos que regem a formação de cavacos para que as indústrias, bem como para o meio acadêmico que utilizam este material, possam minimizar os custos de fabricação através do estabelecimento de condições de corte que venham a apresentar a melhor característica de formação de cavacos.

O objetivo principal do trabalho é estudar o mecanismo de formação do cavaco no torneamento de um aço inoxidável supermartensítico e um aço inoxidável austenítico através do emprego de um método de interrupção súbita de corte. Como objetivos específicos tem-se a manutenção corretiva e reativação do dispositivo *Quick-Stop Device* (QSD) aplicando-o no estudo da raiz do cavaco dos aços inoxidáveis austenítico e supermartensítico, avaliando a microestrutura; a microdureza do plano de cisalhamento; o fator de recalque; a dimensão da zona de fluxo e o ângulo de cisalhamento; além de classificar os cavacos provenientes dos ensaios quanto à sua classe e forma.

## 2 ESTADO DA ARTE

O objetivo deste capítulo é abordar assuntos referentes ao torneamento dos aços inoxidáveis austeníticos e supermartensítico. Serão descritas as características do processo de torneamento, dos aços inoxidáveis, tipos e materiais de ferramentas, bem como dos mecanismos de formação de cavaco e a utilização do dispositivo QSD (*Quick-stop device*).

### 2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

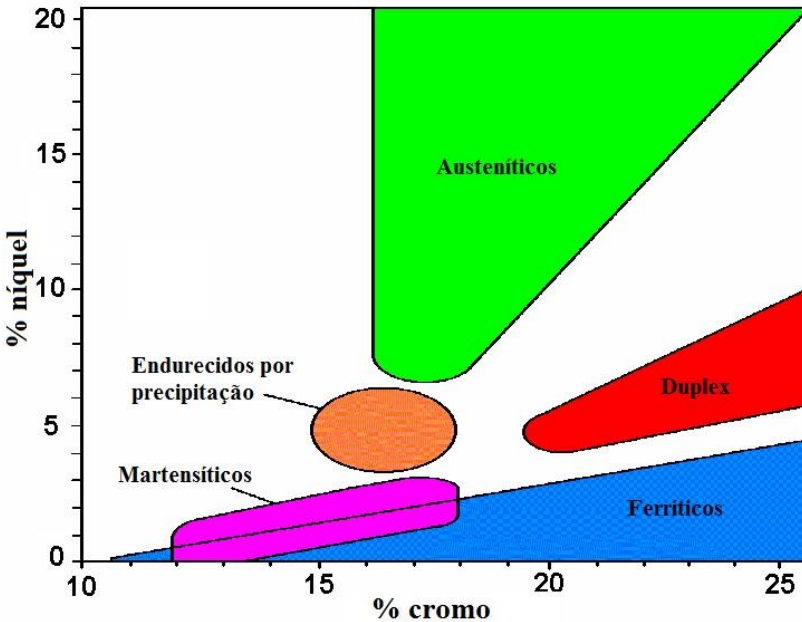
Os aços inoxidáveis são ligas terciárias de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) com teor de cromo mínimo de 10,5%. Outros elementos podem fazer parte da liga, como o níquel, o molibdênio, o cobre, o titânio, o alumínio e o silício, entre outros. No entanto, o cromo se destaca por conferir a característica de resistência à corrosão ao material [6]. Para Silva e Mei [7] aços inoxidáveis são agrupados em cinco categorias:

- **Martensíticos:** são ligas de ferro, cromo (11-18%) e carbono com teor acima de 0,1%. São endurecíveis por tratamento térmico de têmpera. O elevado teor de cromo produz elevadíssima temperabilidade e endurecimento secundário pela precipitação de carbonetos de cromo.
- **Ferríticos:** são ligas de ferro e cromo essencialmente ferrítica em todas as temperaturas, e não endurecem por tratamento térmico de têmpera. Normalmente apresentam teores de cromo mais elevados e teores de carbono menores quando comparados com os martensíticos. São aços com boas características de resistência à corrosão, apresentando tenacidade média a baixa.
- **Austeníticos:** são ligas à base de ferro, cromo (16-30%) e níquel (8-35%) predominantemente austeníticas após tratamento térmico, e possuem teor de carbono, em geral, inferior a 0,08%. Em alguns casos, parte do níquel é substituído por manganês ou nitrogênio devido ao custo mais baixo. São não magnéticos, têm excelente resistência à corrosão e possuem elevada tenacidade. Aços com altos teores de elementos de liga (cromo, níquel, molibdênio, manganês e nitrogênio) têm sido desenvolvidos e classificados como “superausteníticos”.
- **Ferrítico-austenítico (duplex):** microestruturas contendo austenita e ferrita em frações aproximadamente iguais são obtidas com composições balanceadas de ferro, cromo (18-27%), níquel (4-7%), molibdênio (1-4%) e outros elementos. São aços endurecíveis por tratamento térmico.

- Endurecidos por precipitação: são ligas ferro, cromo (12-17%), níquel (4-8%), molibdênio (0-2%) contendo adições que permitam o endurecimento da martensita de baixo carbono pela precipitação de compostos intermetálicos (alumínio, cobre, titânio e nióbio). Combinam a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos com as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis martensíticos.

A Figura 2.1 representa um diagrama das cinco classes de aços inoxidáveis de acordo com a concentração de cromo e níquel. Pode-se observar que o cromo atua como estabilizante da ferrita, já o níquel tem a função de estabilizar a austenita [8].

Figura 2.1 – Classificação dos aços inoxidáveis de acordo com a concentração de cromo e níquel.



FONTE: Adaptado de ATLAS STEELS [8].

A Tabela 2.1 faz uma comparação das propriedades de cada grupo de aços inoxidáveis, sendo que os aços inoxidáveis martensíticos possuem resposta magnética, além de baixa resistência em baixas temperaturas e soldabilidade muito alta, ao contrário dos aços inoxidáveis austeníticos

que não possuem resposta magnética, e possuem elevada resistência em baixas temperaturas e soldabilidade baixa [8].

Tabela 2.1 – Propriedades de cada grupo de aços inoxidáveis.

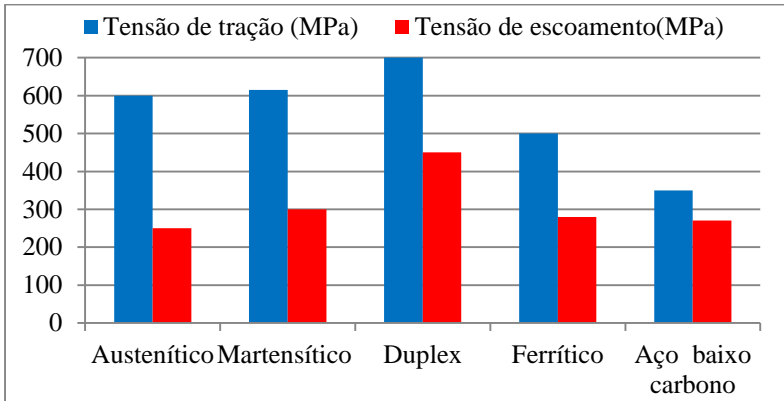
Propriedades	Tipos de Aços Inoxidáveis				
	Austeníticos	Duplex	Ferríticos	Martensíticos	Endurecíveis por precipitação
Resposta magnética	Geralmente não	Sim	Sim	Sim	Sim
Capacidade de encruamento	Muito Alta	Média	Média	Média	Média
Resistência à corrosão	Alta	Muito Alta	Média	Média	Média
Endurecível	Por trabalho a frio	Não	Não	Por têmpera e revenimento	Por envelhecimento
Ductibilidade	Muito alta	Média	Média	Média	Média
Resistência em altas temperaturas	Muito alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa
Resistência em baixas temperaturas	Muito alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa
Soldabilidade	Muito alta	Alta	Baixa e alta	Baixa	Baixa

FONTE: Adaptado de Atlas Steels [8].

Com relação às características mecânicas, os valores típicos de tensão de tração e tensão de escoamento das cinco classes são apresentados na Figura 2.2. Pode-se notar que os aços inoxidáveis martensíticos e austeníticos possuem uma tensão de tração próxima dos 600 MPa, ficando somente abaixo dos aços inoxidáveis duplex que

possuem esta tensão de tração elevada em virtude do aumento dos teores de cromo, molibdênio, presença de nitrogênio e da presença de martensita não revenida.

Figura 2.2 – Valores de tensão de tração e tensão de escoamento dos aços inoxidáveis.



FONTE: Adaptado de ATLAS STEELS [8].

### 2.1.1 Aços inoxidáveis supermartensíticos

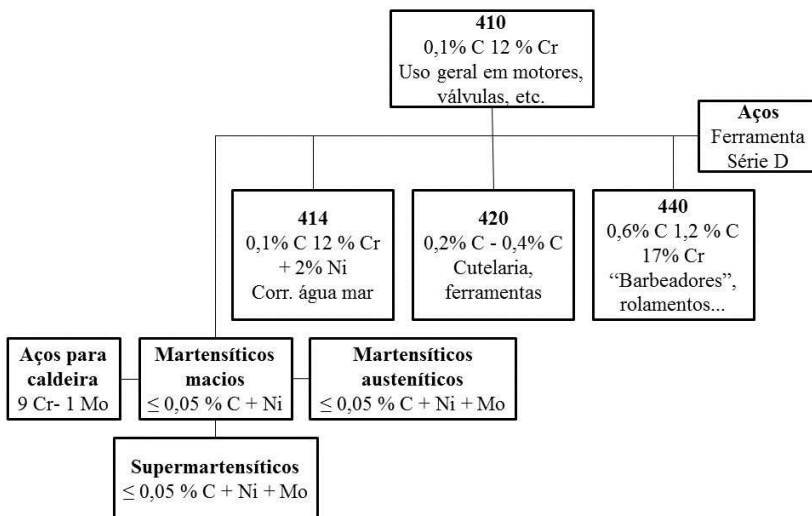
Como já mencionado, os aços inoxidáveis martensíticos convencionais são ligas com composições entre 11 e 18% de cromo e teor de carbono entre 0,1 e 1,2%. Na condição recozida apresentam baixa dureza e boa ductibilidade e são normalmente usinados, conformados ou trabalhados a frio. São ferromagnéticos, endurecíveis por tratamento térmico de têmpera e apresentam estrutura martensítica nesta condição. O aço inoxidável martensítico básico é o AISI 410 e elementos de liga podem ser adicionados a esta composição com objetivos específicos, conforme ilustra a Figura 2.3. O aumento do carbono leva a uma maior dureza reduzindo a tenacidade e a soldabilidade do material [6, 7].

Dentro da classe dos aços inoxidáveis martensíticos convencionais surge uma subclasse que mantém suas propriedades mecânicas e alia um aumento da tenacidade, resistência à corrosão e uma melhora na soldabilidade e que é denominada como classe dos supermartensíticos. Esta classe baseia-se na metalurgia dos aços inoxidáveis martensíticos convencionais, e são caracterizados por teores de carbono muito baixos ( $C \leq 0,02\%$ ) e composições em torno de 12% Cr, 2-6% Ni, e 0-2,5% Mo.



Esse percentual de carbono permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas, que durante o resfriamento se transforma em martensita, conferindo maior dureza à liga [7, 9]. De acordo com Farrar [10] os aços inoxidáveis supermartensíticos são um desenvolvimento dos aços martensíticos com níveis muito baixos de elementos intersticiais, principalmente de carbono e nitrogênio.

Figura 2.3 – Aços inoxidáveis martensíticos derivados do AISI 410 por meio de alteração da composição química e sua relação com outras famílias de aços.



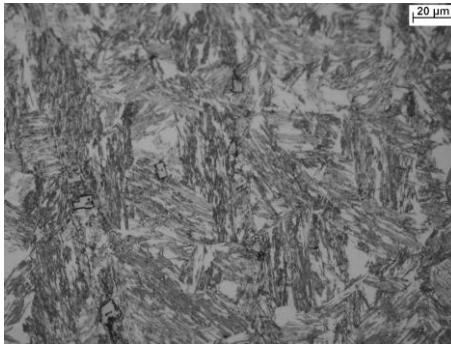
FONTE: Silva e Mei [7].

Essa classe de aço inoxidável tem o conceito metalúrgico de aumentar o teor de cromo efetivo em solução sólida na matriz através da redução do teor de carbono, juntamente com a adição de níquel para manter a fase martensítica sem a presença de ferrita, e a adição de molibdênio para melhorar a resistência à corrosão localizada e à corrosão sob tensão [11].

A Figura 2.4 apresenta a microestrutura de um aço inoxidável supermartensítico (UNS S41426), após ataque com reagente Vilela. Pode-se observar que o material apresenta martensita de baixo carbono super-revenida, sendo que o aço inoxidável supermartensítico apresenta uma quantidade menor de carbonetos em relação a um aço inoxidável martensítico padrão (UNS S41000) devido à sua maior quantidade de

carbono [12]. Os carbonetos provavelmente atuarão como precipitados abrasivos, reduzindo o tempo de vida da ferramenta durante a usinagem [13]. Encontra-se também uma pequena quantidade de ferrita delta na forma de estrias que é indesejável para o aço, pois a ferrita tem valores de dureza inferiores em aproximadamente 100 – 150 HV se comparada com um aço completamente martensítico, apresentando com isto uma tensão de escoamento inferior [14].

Figura 2.4 – Microestrutura de um aço inoxidável supermartensítico UNS S41426.



Fonte: Corrêa [12].

Della Rovere *et al.* [15] analisaram a microestrutura de um aço inoxidável supermartensítico (UNS S41426) e verificaram a presença de martensita temperada com nenhuma evidência de ferrita e algumas partículas de carbonitreto de titânio aparentes, além de um teor de austenita retida substancialmente de cerca de 12,2% em volume.

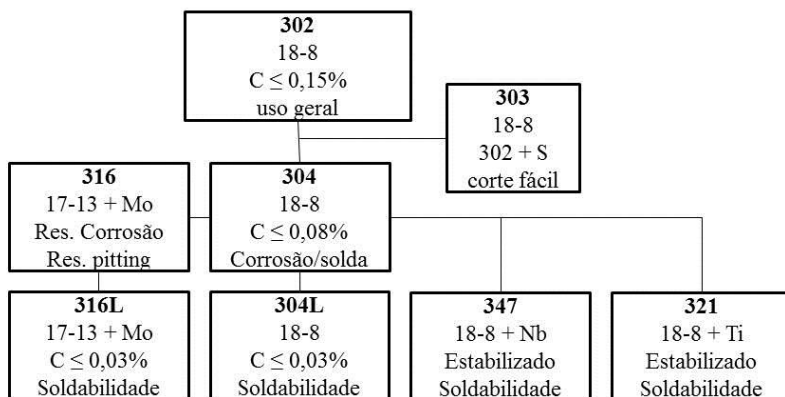
Os aços inoxidáveis supermartensíticos são empregados na fabricação de tubos e outros equipamentos, principalmente na indústria de petróleo e gás natural, onde características críticas como soldabilidade, resistência mecânica e resistência à corrosão são necessárias. Estima-se que já no começo dos anos 2000 mais de 600 km de tubos de aços inoxidáveis supermartensíticos haviam sido produzidos ao redor do mundo. Devido a suas características e propriedades este aço torna-se desejável do ponto de vista econômico [7, 16, 17].

### 2.1.3 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são caracterizados por uma boa resistência à corrosão, elevada tenacidade e boa soldabilidade. A estrutura austenítica (CFC) é estabilizada à temperatura ambiente pela adição de níquel e manganês. A resistência à corrosão aumenta com o teor de cromo e molibdênio e a resistência à corrosão sob tensão é obtida com o aumento de molibdênio e níquel. A resistência mecânica pode ser aumentada por meio de adição de nitrogênio ou utilizando o endurecimento por precipitação [7].

Sua estrutura austenítica torna o aço interessante para aplicações criogênicas e também a temperaturas elevadas. As composições básicas dos aços inoxidáveis austeníticos giram em torno de 18% Cr e 8 % Ni. A Figura 2.5 apresenta os principais aços austeníticos [7].

Figura 2.5 – Principais aços inoxidáveis austeníticos e suas relações por meio da composição química.

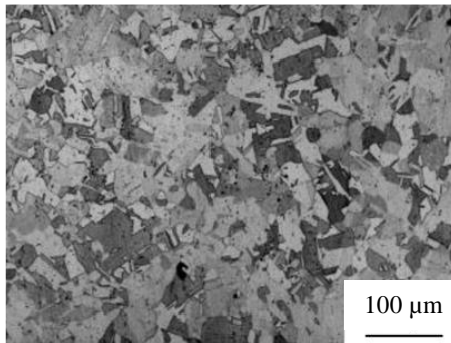


FONTE: Silva e Mei [7].

A Figura 2.6 mostra a micrografia do aço inoxidável austenítico Fe-25Cr-20Ni em seu estado inicial, mostrando a presença de grãos equiaxiais de austenita e maclas (tipo de defeito cristalino que pode ocorrer durante a solidificação, deformação plástica, recristalização ou crescimento de grão) de tratamento térmico característicos do material e uma pequena presença de estrutura martensítica nas regiões mais escuras. Este fenômeno de transformação martensítica ocorre devido à deformação

plástica no processo de fabricação a frio do material [18, 19]. Analisando a microestrutura de um aço inoxidável austenítico AISI 304 Chagas *et al.* [20] verificaram a presença de martensita induzida pela deformação do processo de fabricação.

Figura 2.6 – Micrografias do aço inoxidável austenítico Fe-25Cr-20Ni.



FONTE: Xiong *et al.* [18].

Os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados na indústria química e petroquímica, devido à sua excelente resistência mecânica, plasticidade e resistência à corrosão. São aplicados na indústria alimentícia, química, aeronáutica, naval, automobilística, celulose e em equipamentos hospitalares [7, 18].

## 2.2 USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

O termo usinabilidade significa a facilidade ou dificuldade de se usinar um material, ou seja, quão fácil ou difícil é, em um processo de usinagem, retirar uma parcela do material em forma do cavaco. A usinabilidade de um material pode ser avaliada em função dos critérios de força de usinagem, vida da ferramenta, formação de cavacos e acabamento da superfície, entre outros [21]. Além das propriedades mecânicas do material, a usinabilidade também depende das condições de corte empregada. A usinabilidade não é uma propriedade do material, mas a maneira como o material se comporta durante a usinagem em condições específicas. Os aços inoxidáveis são considerados difíceis de usinar, principalmente os austeníticos, pelo alto grau de encruamento; os duplex e superduplex, pela alta resistência; e os martensíticos e

supermartensíticos, pela dureza elevada, exigindo maior esforço de corte devido à presença da martensita e de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo [1].

As diferenças de usinabilidade de aços inoxidáveis decorrem em função da diferença de resistência à tração, conforme indica a Figura 2.2, e o baixo teor de carbono. As classes mais novas dos aços inoxidáveis duplex tendem a ter uma pior usinabilidade em virtude da maior porcentagem de nitrogênio na liga. As características dos aços inoxidáveis que mais influenciam na usinabilidade são sua alta taxa de encruamento, elevada ductilidade e baixa condutividade térmica [3].

Uma comparação em termos de usinabilidade de diferentes aços inoxidáveis em relação a um aço de corte livre de baixa liga é mostrada na Tabela 2.2, onde se comprova que os martensíticos e austeníticos são aços de difícil usinabilidade.

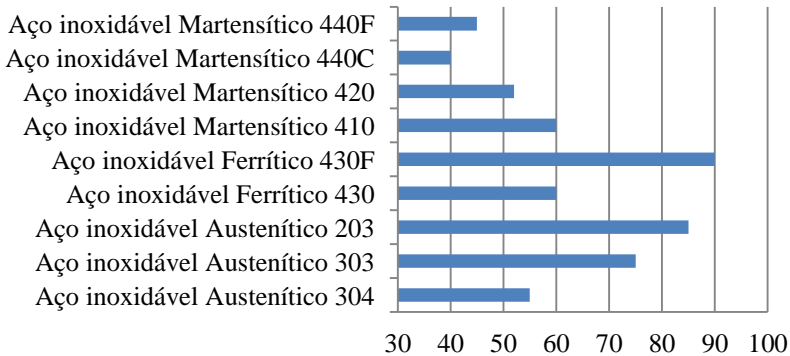
Tabela 2.2 – Índice de usinabilidade de diferentes aços inoxidáveis.

Tipo de aço		Índice de usinabilidade
Usinagem de aço de corte livre de baixa liga		1,00
Aço inoxidável austenítico	AISI304	0,52
Aço inoxidável ferrítico	AISI430	0,60
Aço inoxidável duplex	AISI 2205	0,50
Aço inoxidável martensítico	Padrão de baixo carbono AISI410	0,50
	Padrão de alto carbono AISI440C	0,40

FONTE: Adaptado de Atlas Steels [8].

SSINA [22] também fez uma comparação da usinabilidade dos aços inoxidáveis frequentemente usados pela indústria com um aço de corte livre de baixo carbono. Os resultados são apresentados na Figura 2.7, sendo que 100% equivale a um aço de corte livre de baixo carbono. Comparativamente, os aços martensíticos tem um índice de usinabilidade menor que os aços austeníticos.

Figura 2.7 – Comparativo da usinabilidade dos aços inoxidáveis em porcentagem com relação ao aço de corte livre de baixo carbono.



FONTE: SSINA [22].

Pode-se prever um desempenho qualitativo da usinabilidade de acordo com os elementos de liga presentes nos aços inoxidáveis [4]. Os elementos de liga influenciam a usinabilidade por meio da alteração da composição do aço ou pela formação de inclusões abrasivas e lubrificantes [21]. Os efeitos dos principais elementos de ligas que são determinantes na usinagem estão relacionados abaixo.

- Carbono (C): melhora o endurecimento das ligas e forma carbonetos com Cr, V e Fe, gerando uma maior resistência ao desgaste abrasivo, gerando um efeito negativo na usinabilidade [4].
- Cromo (Cr): prejudica o desempenho do material na usinagem, usado como aditivo para melhorar a temperabilidade, a resistência mecânica a resistência à corrosão e a resistência ao desgaste abrasivo [4, 21].
- Manganês (Mn): aumenta a temperabilidade e a resistência do aço (aproximadamente 100 N/mm<sup>2</sup> para cada 1% do elemento na liga) Ligas de aço de baixo carbono contendo até 1,5% de manganês facilitam a usinabilidade devido a uma formação do cavaco favorável [21].
- Molibdênio (Mo): aumenta a resistência aos mecanismos de corrosão em ambientes severos, aumenta a dureza a quente, a resistência mecânica, a ductilidade e a temperabilidade, prejudicando a usinagem [21, 23].
- Níobio (Nb): assim como o titânio, inibe a formação de carboneto de cromo devido ao possuir uma afinidade maior pelo carbono

precipitando carbonitreto de nióbio e o cromo permanecendo em solução sólida. Aumenta a resistência à corrosão e a resistência mecânica; precisa ser usinado em baixas velocidades [4].

- Níquel (Ni): amplia a zona da fase austenítica na liga. Aumenta a resistência à corrosão, a resistência mecânica e a dureza, diminuindo a usinabilidade. É usado combinado com o cromo para melhorar o desempenho mecânico a quente. Ligas que contêm níquel tendem a formar gume postiço e desgaste de entalhe na ferramenta, prejudicando a usinagem [4, 21].
- Nitrogênio (N): aumenta a resistência à corrosão, diminui a ductilidade e tenacidade após a têmpera [24].
- Titânio (Ti): combinado com Al, Mn, ou V produz ligas de baixa densidade que possuem excelente resistência à corrosão e mecânica, aumenta a força de usinagem consideravelmente, dificultando sua usinagem. Os principais problemas da usinagem são o baixo tempo de vida da ferramenta e formação de gume postiço [4, 9].
- Tungstênio (W): é acrescentado para melhorar a dureza e diminuir a condutividade térmica, mas prejudica o desempenho do material na usinagem [4, 21].
- Vanádio (V): retarda o crescimento de grão, dificultando a usinagem. Combinado com o cromo resulta em boas propriedades de corte, mas aumenta a resistência mecânica, a ductilidade, força de corte e formação de cavaco, prejudicando a usinagem [4, 21].

### **2.2.1 Torneamento de aços inoxidáveis**

Inúmeros componentes funcionais e de suporte em diversas aplicações industriais são tipicamente construídos em aços inoxidáveis para suportarem as condições físicas da aplicação, principalmente quanto às solicitações de resistência à corrosão, ao desgaste e a resistência às solicitações mecânicas. O objetivo da usinagem é garantir que as dimensões e características das superfícies usinadas satisfaçam as exigências do projeto. O desenvolvimento de novos aços inoxidáveis, de ferramentas de corte aliado e de máquinas-ferramentas com elevada rigidez abriu um novo campo de aplicações e estudos na usinagem destes materiais.

O processo de torneamento é o mais empregado para o estudo da usinabilidade. Pode-se classificar o torneamento em desbaste ou acabamento. No desbaste uma alta taxa de remoção de material é atingida

e no acabamento o objetivo é realizar a usinagem com um elevado nível de precisão dimensional e qualidade dimensional através de pequenas remoções de cavacos [21].

Os parâmetros de corte durante o torneamento são: velocidade de corte  $v_c$  (m/min), avanço  $f$  (mm) e a profundidade de corte  $a_p$  (mm), sendo que o produto destes três resulta na taxa de remoção de material [3, 4, 25].

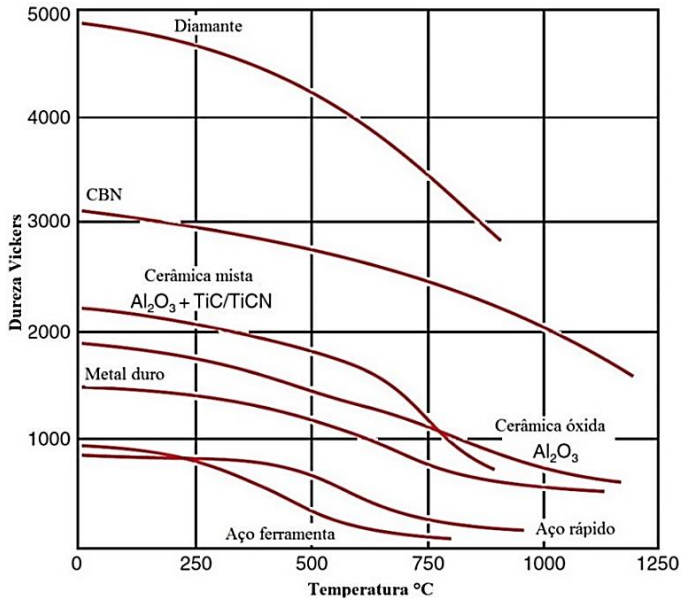
No torneamento de aços inoxidáveis é necessário seguir algumas recomendações como: utilizar máquina-ferramenta rígida; manter a extensão da ferramenta a mais curta possível; não usar um raio de quina maior que o necessário; projetar uma profundidade de corte sempre abaixo da camada endurecida resultante do passe anterior; utilizar sempre uma ferramenta com gumes afiados; monitorar a força de usinagem e trocar o inserto com o aumento da força de usinagem; usar bastante fluido lubrificante; usar insertos de metal-duro revestidos com PVD com quebra cavaco positivo; na operação de desbaste usar altos valores de avanço e profundidade combinado com baixas velocidades de corte [26].

### **2.2.2 Ferramentas de corte**

As ferramentas de corte devem apresentar três propriedades predominantes: estabilidade química e física a altas temperaturas, resistência à ruptura frágil e alta resistência ao desgaste abrasivo [27]. O material da ferramenta precisa ser mais duro que a peça, por isto o desenvolvimento de ligas com maiores resistências mecânicas e dureza leva ao desenvolvimento de novos materiais de ferramentas [4]. O desempenho da ferramenta depende de vários fatores como: dureza, resistência à compressão, resistência à flexão e tenacidade, resistência do gume, resistência interna de ligação, resistência à quente, resistência à oxidação, baixa propensão a difusão e adesão, resistência à abrasão [21]. A Figura 2.8 mostra a variação de dureza em relação à temperatura de usinagem dos principais materiais de ferramentas de corte. É possível observar que todos os materiais para ferramentas perdem dureza com o aumento de temperatura e ferramentas à base de CBN suportam temperaturas mais elevadas.



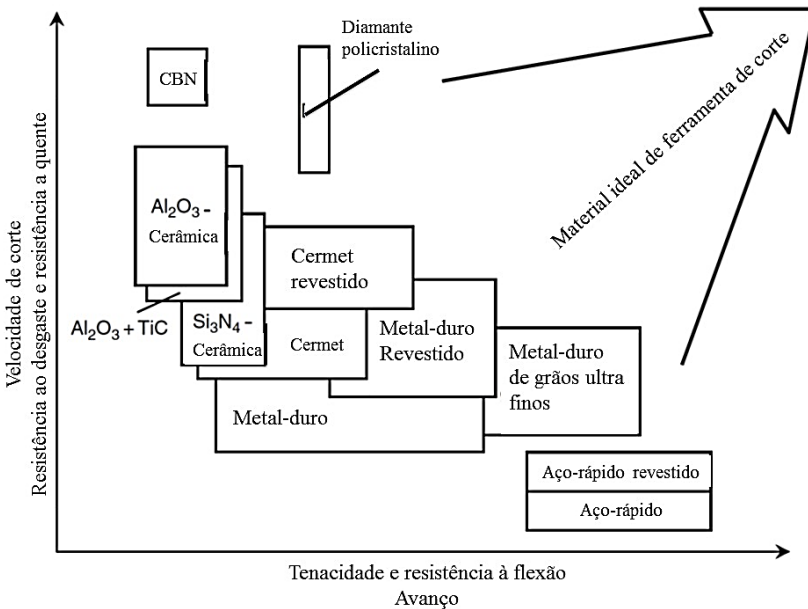
Figura 2.8 – Variação da dureza do material em função do calor.



FONTE: Adaptado de Klocke [21].

A Figura 2.9 indica as propriedades dos materiais de ferramentas existentes atualmente no mercado e as características para cumprirem as necessidades da usinagem em função da velocidade de corte e do avanço. O aumento da velocidade de corte exige um aumento da resistência a quente e o aumento do avanço exige um aumento da tenacidade. Não existe ainda um material de ferramenta que atenda simultaneamente as propriedades idealizadas para uma ferramenta de corte.

Figura 2.9 – Classificação dos materiais de ferramentas de corte.



FONTE: Adaptado de Klocke [21].

O metal-duro é o material de ferramenta mais utilizado na usinagem devido as suas propriedades e preço. A norma ABNT ISO 513/2013 [28] classifica os materiais de ferramentas de corte em seis grupos identificados por letras e designados por cores, conforme a Tabela 2.3. As classes K, P e M são preferenciais dos metais-duros, sendo que a classe K contém WC + Co, sendo que quando adicionado TiC, TaC e/ou NbC se designa classe P e quando WC+Co possui adições de TiC, TaC e/ou NbC em menores quantidades se designa classe M. As classes N (materiais não ferrosos), S (superligas e titânio) e H (aços endurecidos) não são exclusivas dos metais duros e abrangem as cerâmicas e os materiais ultraduros [4, 21].

Tabela 2.3 – Classificação dos materiais de ferramentas de corte.

Principais Classes		
Identificação		Materiais a serem usinados
Letra	Cor	
P	Azul	Aços
M	Amarelo	Aço inoxidável
K	Vermelho	Ferro fundido
N	Verde	Metais não ferrosos
S	Marrom	Superligas e titânio
H	Cinza	Materiais duros

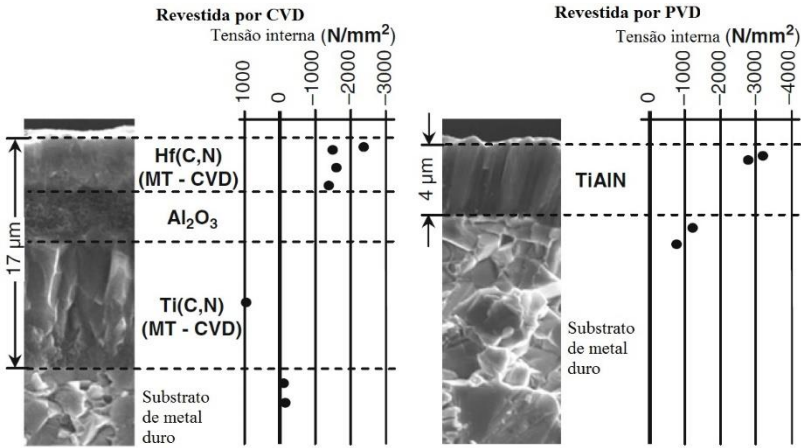
FONTE: Adaptado de Norma ISO 513/2013 [28].

Os revestimentos nas ferramentas de corte aumentam a vida da ferramenta na usinagem entre duas a três vezes devido a uma redução no coeficiente de atrito e nos mecanismos de desgaste [21]. Os metais-duros podem receber tanto o processo de revestimento PVD como o CVD, já que as temperaturas elevadas do processo CVD (aproximadamente 1000°) não alteram metalurgicamente a ferramenta, diferente do que ocorrem com as ferramentas de aço-rápido [4].

Duas ferramentas de metal-duro revestidas pelos processos CVD e PVD são ilustradas na Figura 2.10. Conforme apresentado, os revestimentos por CVD apresentam tensões residuais de tração e os revestimentos PVD, tensões residuais de compressão. As coberturas CVD possuem alta resistência ao desgaste e possuem excelente adesão ao metal-duro. Revestimento em CVD normalmente acarreta em uma diminuição da tenacidade da ferramenta causada pela tensão residual de tração deixada pelo processo. Essa tensão residual de tração do revestimento tem origem no resfriamento da temperatura do revestimento a temperatura ambiente, devido à diferença dos coeficientes de expansão térmica do substrato e dos revestimentos. As tensões residuais de compressão nos revestimentos dificultam a propagação da trinca, gerando uma maior resistência a fratura da ferramenta [4, 21, 29].

Os revestimentos de TiC ou TiCN são utilizados como primeira camada por garantirem uma coesão com o substrato, além de serem revestimentos com maior dureza, gerando assim uma alta resistência ao desgaste da ferramenta. O revestimento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> garante uma estabilidade térmica em altas temperaturas e uma boa resistência ao desgaste por abrasão. O revestimento de TiN reduz o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta [1, 4].

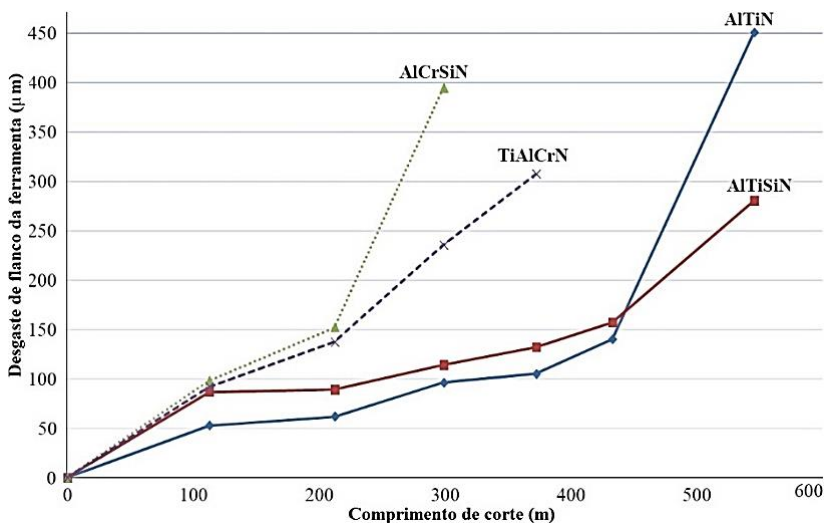
Figura 2.10 – Influências dos métodos de revestimento CVD e PVD sobre as tensões residuais do revestimento.



FONTE: Adaptado de Klocke [21].

Fernández-Abia *et al.* [30] avaliaram o desempenho de quatro tipos diferentes de revestimentos de ferramentas pelo processo PVD ( $AlTiSiN$ ,  $AlCrSiN$ ,  $AlTiN$  e  $TiAlCrN$ ), durante o torneamento de um aço inoxidável austenítico AISI 304L com uma ferramenta de metal-duro de geometria TNMG 1620408-23 nas seguintes condições:  $v_c = 250$  m/min,  $f = 0,3$  mm e  $a_p = 1,6$  mm. A Figura 2.11 mostra que as ferramentas com revestimentos  $AlTiSiN$  e  $AlTiN$  tiveram um menor desgaste ao usinar AISI 304L. O desempenho da ferramenta com revestimento  $AlTiSiN$  foi superior devido à sua estrutura nano-cristalina, que favorece uma difusão rápida de alumínio para a superfície da ferramenta, através das fronteiras de grãos, acelerando a formação de uma camada protetora sobre a ferramenta, que reduz a condutividade térmica e impede a aderência de aço inoxidável.

Figura 2.11 – Desempenho de diferentes tipos de revestimentos PVD.

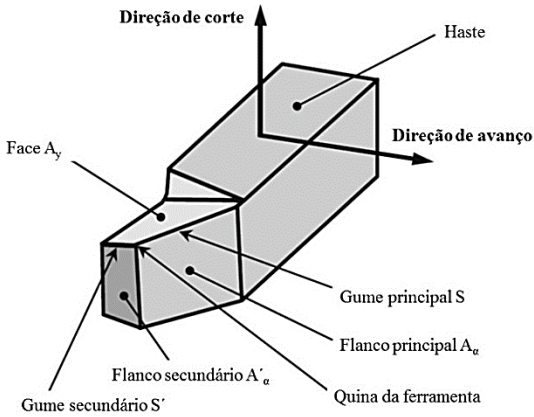


FONTE: Adaptado de Fernández-Abia *et al.* [30].

### 2.2.3 Geometria da ferramenta

As principais características de uma ferramenta de corte para torneamento em relação à geometria são normalizadas pela norma DIN 6581 [31] e pela ISO 3002/1 [32]. A Figura 2.12 define as superfícies, o gume e a quina de uma ferramenta. O cavaco escoa pela face ( $A_y$ ) da ferramenta durante a usinagem. Os flancos principal ( $A_\alpha$ ) e secundário ( $A'_\alpha$ ) determinam a folga entre a superfície usinada e a ferramenta. Devido ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta o cavaco é gerado pela ação da cunha de corte, que é composta pela face e o flanco principal, sendo o gume principal ( $S$ ) a sua interseção. O gume secundário ( $S'$ ) é a interseção do flanco secundário e a face sendo que, em decorrência dos movimentos relativos, o gume secundário pode ter função de gume principal [3, 4, 21].

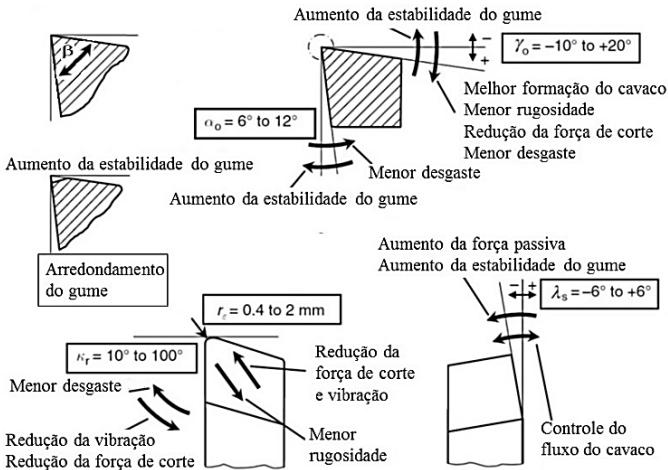
Figura 2.12 – Características de uma ferramenta de torneiar.



FONTE: Adaptado de Klocke [21].

Os principais ângulos de uma ferramenta de corte e suas influências nas características de usinagem são mostrados na Figura 2.13. Quanto maior o ângulo de cunha ( $\beta$ ) maior é a estabilidade da ferramenta.

Figura 2.13 – Influência da geometria da ferramenta nas características de usinagem.



FONTE: Adaptado de Klocke [21].

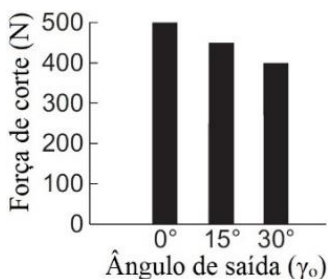
O ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) influencia nas componentes da força de usinagem e na potência de corte. Quanto maior o ângulo de saída menor será a força de corte, melhor a formação de cavacos e será gerada uma superfície com rugosidade menor, porém ângulos negativos garantem uma maior resistência do gume. O ângulo de incidência ( $\alpha_o$ ) tem a função de evitar o atrito entre a peça e a ferramenta, sendo que quanto maior for a resistência mecânica da peça durante a usinagem menor deverá ser o ângulo de folga.

O ângulo de inclinação lateral ( $\lambda_s$ ) controla a direção de saída do cavaco e quando positivo diminui as vibrações. Quanto menor for o ângulo de inclinação da ferramenta maior é a força passiva de usinagem, porém a estabilidade do gume aumenta.

O ângulo de direção do gume ( $\kappa_r$ ) tem a função de distribuir a força de corte, diminuir vibração e influenciar a direção de saída do cavaco. O raio de quina ( $r_f$ ) tem a função de garantir a resistência da ponta da ferramenta e sua capacidade de dissipação de calor [21].

Atlati *et al.* [33] tornearam uma liga de alumínio AA2024-T351 com uma ferramenta de metal-duro não revestida. A Figura 2.14 mostra que quanto maior o  $\gamma_o$  menor foi a força de corte.

Figura 2.14 – Efeito do ângulo de saída sobre a força de corte.



FONTE: Adaptado de Atlati *et al.* [33].

Noordin *et al.* [34] verificou a influência do ângulo de direção do gume ( $\kappa_r$ ) na usinagem de um aço inoxidável martensítico com uma composição de 0,38% C, 0,5% Mn, 0,9% Si, 13,6% Cr e 0,3% V, comparando uma ferramenta de metal-duro com uma de cermet. Os resultados obtidos mostraram que ao diminuir o  $\kappa_r$  a vida da ferramenta aumenta, fato que ocorre devido à diminuição da força específica por unidade de comprimento do gume, garantindo uma diminuição do desgaste da ferramenta [21].

## 2.2.4 Parâmetros de Corte

Machado *et al.* [4] sugerem duas faixas distintas de velocidade de corte que devem ser adotadas na usinagem dos aços inoxidáveis ferríticos/martensíticos: entre 40 e 90 m/min e entre 180 e 400 m/min, sendo que valores abaixo de 40 m/min possivelmente ocorre formação de gume posição. A Tabela 2.4 apresenta os parâmetros de corte para o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos e supermartensíticos de acordo com as referências pesquisadas.

Tabela 2.4 – Parâmetros usinagem utilizados em pesquisas no torneamento de aços inoxidáveis.

Pesquisa	Material da ferramenta / revestimento	Material usinado (Classe)	Parâmetros de usinagem		
			$v_c$ (m/min)	$f$ (mm)	$a_p$ (mm)
Korkut 2004 [35]	Metal-duro / $Al_2O_3 - Ti(C,N) - TiN$	AISI 304 (austenítico)	120 - 210	0,24	2,5
Barbosa 2014 [36]	Meta-duro / TiN	AISI 304 (austenítico) e Super 13 Cr /supermartensítico	100-280	0,20 – 0,43	2,77
Corrêa 2014 [12]	Meta-duro / TiC – TiCN - TiN	Super 13 Cr /supermartensítico	10 - 400	0,15 – 0,40	0,5 - 3
Kulkarni 2013 [37]	Meta-duro / TiC – TiCN - TiN	AISI 304 (austenítico)	140 - 320	0,08 – 0,26	1
Naves 2013 [38]	Meta-duro / TiN	AISI 316 (austenítico)	300	0,2	1
Ribeiro <i>et al.</i> 2010 [39]	Meta-duro / TiN	AISI 304 (austenítico)	105 - 210	0,138	1,5
Silva 2007 [40]	Meta-duro / TiN	AISI 304 (austenítico)	125-170	0,15	1

Korkut *et al.* [35] usinaram a seco um aço inoxidável austenítico AISI 304 com uma ferramenta de metal-duro com a geometria CNMG 120408E-2N variando a  $v_c$  entre 120 e 210 m/min e mantendo constante  $a_p = 2,5$  mm e  $f = 0,24$  mm. Segundo os autores a velocidade de corte ótima é igual a 180 m/min, pois na mesma foi usinada uma maior quantidade de material até chegar ao desgaste de flanco estipulado. Estes resultados podem ser explicados devido ao amolecimento térmico da ferramenta, devido à maior influência do calor sobre a ferramenta de corte,

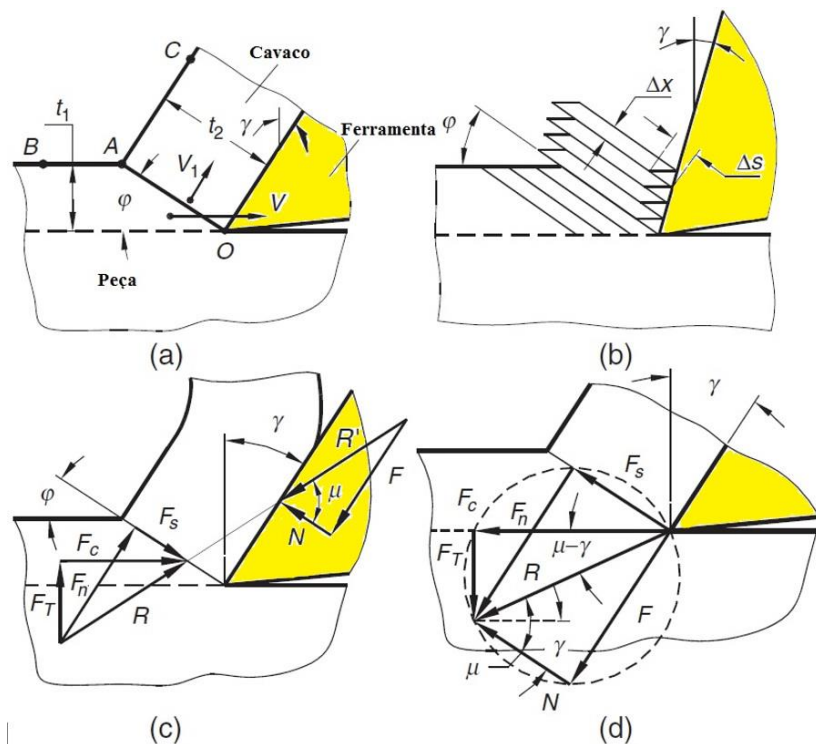


com o aumento da velocidade de corte mais calor vai para o cavaco, menos calor vai para a peça e a ferramenta de corte [35].

### 2.3 MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAVACO

Existem muitas publicações e teorias propondo o mecanismo de formação de cavaco. Há modelos que possuem uma estimativa muito próxima dos dados experimentais em algumas situações, mas em outras fornecem resultados dispersos dos valores experimentais. A Figura 2.15 apresenta modelos do mecanismo de formação de cavaco concebido por alguns autores [25].

Figura 2.15 – Mecanismos de formação de cavaco: (a) proposto por Time; (b) proposto por Piispanen; (c) e (d) propostos por Merchant.

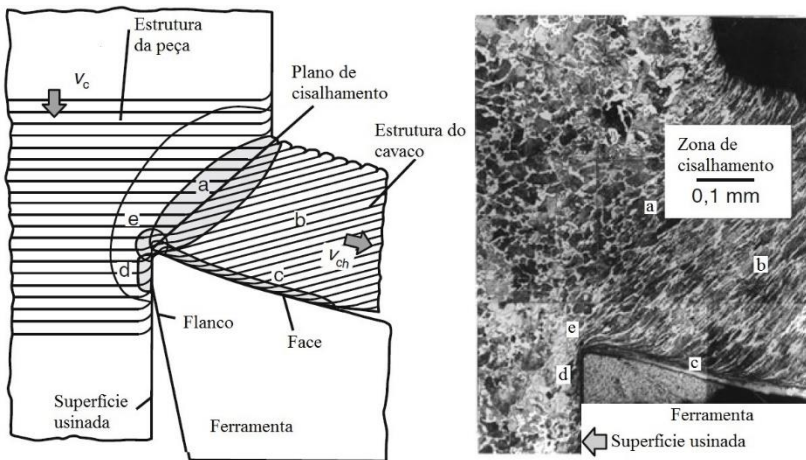


FONTE: Adaptado de Astakhov [25].

Apesar de existirem modelos diferentes, os conceitos básicos nos diferentes modelos são os mesmos. O cisalhamento dos metais nas operações de usinagem ocorre quando o material é submetido a deformações elásticas e plásticas (em alguns casos nos materiais frágeis apenas elásticas), até sofrer ruptura, normalmente por cisalhamento, ao longo do plano denominado de “plano de cisalhamento” (ou zona primária de cisalhamento).

Uma representação esquemática do mecanismo de formação de um cavaco contínuo é apresentada na Figura 2.16. Com a penetração do gume o material da peça na região (a) o material passa pelo cisalhamento (zona de cisalhamento primária) e é removido na forma de cavaco, conforme região (b). Ao usinar matérias frágeis, como por exemplo o ferro fundido, qualquer deformação plástica leva à separação do cavaco com a peça, entretanto, quando o material tem uma capacidade de deformação maior, a separação só ocorre à frente do gume na região (e). A região (c) é chamada de zona de cisalhamento secundária, e na região (d) é chamada de zona de cisalhamento terciária [21].

Figura 2.16 – Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco (direita) e micrografia da região de formação do cavaco (esquerda).



FONTE: Adaptado de Klocke [21].

A energia gasta na formação de cavaco é percebida na zona de cisalhamento primária, secundária e terciária sendo que na zona de cisalhamento primária o calor vem do trabalho de cisalhamento do

material e nas zonas de cisalhamento secundárias e terciárias o calor vem do atrito e do cisalhamento provocado pela aderência entre as superfícies [4].

O movimento do cavaco sobre a superfície da ferramenta tem influência no mecanismo de formação do cavaco, na força de usinagem, no calor gerado, na temperatura de corte e no desgaste da ferramenta. As condições da interface cavaco-ferramenta influenciam diretamente no valor do ângulo e cisalhamento ( $\phi$ ). Nesta interface localiza-se a zona de cisalhamento secundária, que oferece resistência ao movimento do cavaco.  $\phi$  e  $R_c$  (grau de recalque) dependem das condições da interface cavaco-ferramenta, e isto é função do material da peça, material da ferramenta, condições de corte e dos meios lubrificantes [4, 21].

### 2.3.1 Interface cavaco-ferramenta

O processo de formação de cavaco é um ciclo e a última etapa desse ciclo é o movimento do cavaco sobre a face da ferramenta. Essa etapa tem influência sobre todo o processo, especialmente nas taxas de desgaste da ferramenta, no mecanismo de formação de cavaco, na temperatura de corte e na força de usinagem, sendo necessário entender como acontece este movimento. O estudo da interface cavaco-ferramenta é uma tarefa difícil devido às altas velocidades envolvidas na saída do cavaco e dimensões reduzidas da superfície de saída da ferramenta. As teorias disponíveis vêm de estudos realizados com auxílio de dispositivos interrupção súbita do processo de corte (dispositivos *Quick-stop device*) e, também, de medições de deformações e temperaturas na região do corte [3, 4].

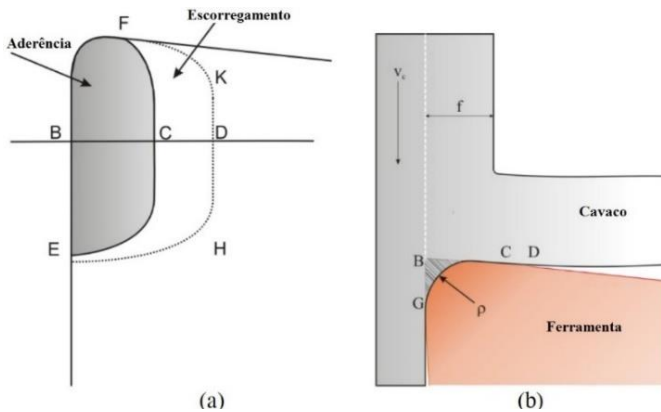
Na usinagem dos metais, pelo menos três condições de interface cavaco-ferramenta podem ser encontradas: aderência mais escorregamento, escorregamento e gume postigo [4]. Com a utilização de dispositivos *Quick-stop device* para obter a raiz do cavaco foi possível obter evidências claras de contato absoluto na zona de aderência. Na zona de aderência o movimento na interface cavaco-ferramenta ocorre por cisalhamento dentro do material, e uma zona de cisalhamento é formada próxima à interface chamada zona de fluxo [3].

Na Figura 2.17 pode-se ver que a zona de aderência (linha BC) se estende do gume para dentro da superfície de saída da ferramenta. Como Trent e Wright [3] citam, em usinagem as condições de aderência são consideradas inevitáveis, devido às altas tensões de compressão e taxas de deformação, que provocam altas temperaturas e o íntimo contato entre o cavaco e ferramenta, possibilitando, então, o estabelecimento de ligações

atômicas entre as partes. Alguns lubrificantes sólidos podem minimizar ou suprimir a zona de aderência na interface cavaco-ferramenta, prevalecendo apenas uma zona de escorregamento e contribuindo para uma menor temperatura na ferramenta. A adição de 2 a 3% de Chumbo (Pb) promove o desaparecimento da zona de aderência [3, 4].

A zona de escorregamento (representada pela linha CD da Figura 2.17) acontece após a zona de aderência. Devido às ligações mais fracas entre os materiais da peça e da ferramenta, o cavaco escorrega sobre a superfície de saída. A zona de escorregamento se deve às baixas tensões de compressão atuando nessa região, em geral, decorrentes de baixas velocidades de corte, possibilitando o acesso do oxigênio entre o cavaco e a ferramenta, formando óxidos que dificultam ligações metálicas fortes entre o cavaco e a ferramenta [4].

Figura 2.17 – Zona de aderência e escorregamento.



FONTE: Adaptado de Trent e Wright [3].

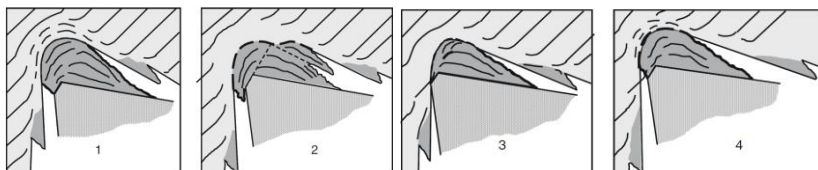
Um fenômeno que ocorre na interface cavaco-ferramenta para baixas velocidades de corte é a formação do gume postiço, onde o material da peça, encruado sob altas tensões de compressão e elevada temperatura, se deposita no gume da ferramenta, modificando a geometria da mesma. Uma sucessão de camadas forma o gume postiço, até o seu tamanho atingir um valor no qual a tensão de cisalhamento é suficiente para mudar a zona de cisalhamento primária e então sua estrutura é cisalhada e arrastada entre a superfície da peça e a superfície do cavaco [21].

Lucas [41] usinou GGG42 e na faixa de velocidade de corte entre 20 e 40 m/min e verificou que o gume postiço apresenta uma estrutura

severamente deformada e alongada no sentido de deformação. Acima de 80 m/min verificou que não ocorre mais a formação do gume postiço. Foi verificado que a dureza do gume postiço ficou em uma faixa entre 400 e 440 HV, contra 320 a 360 HV de dureza no cavaco e entre 200 e 240 HV no material da peça. Quando ocorrem fraturas do gume postiço durante a usinagem, os fragmentos são expulsos pelo cavaco sobre a face da ferramenta praticamente não afetando o desgaste na face da ferramenta e pela interface gume-flanco e superfície de corte, resultando em um desgaste acentuado na ferramenta no flanco devido à dureza elevada destas partículas.

A Figura 2.18 mostra o ciclo de formação de gume postiço durante a usinagem. A formação do gume postiço é intermitente, aumenta até que os esforços de cisalhamento permitam a formação de planos de cisalhamento em sua estrutura. Estes planos de cisalhamento estão a  $90^\circ$  entre si, de forma que podem ocorrer tanto na direção da saída do cavaco, como também na direção de corte. Os fragmentos que são removidos na direção de corte atiram entre a superfície de corte e o flanco da ferramenta, levando a um aumento no desgaste de flanco. A formação de gume postiço modifica a geometria da ferramenta, sendo que com isso alteram-se as componentes da força de usinagem e a rugosidade da superfície usinada [21].

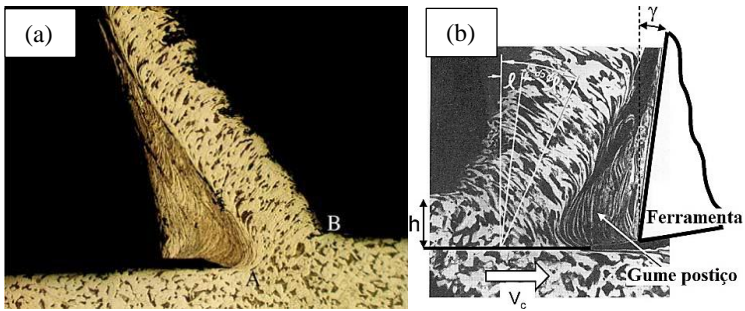
Figura 2.18 – Representação do gume postiço.



FONTE: Klocke [21].

Chern [42] verificou a formação de gume postiço ao usar aço AISI 1017 com uma velocidade de corte de 15 m/min e avanço de 0,101, conforme a Figura 2.19(a). A Figura 2.19(b) mostra a formação do gume postiço sobre o gume da ferramenta ao usar o aço AISI 5140 com uma velocidade de corte de 30 m/min, um avanço de 0,15 mm e uma profundidade de corte de 2 mm e  $\gamma_0$  de  $5^\circ$  [43]. A estrutura do gume postiço é rígida e constituída de células finas e microbandas alongadas no sentido de deformação [3].

Figura 2.19 – Exemplos da presença do gume postiço durante a usinagem.



FONTE: Chern [42] (a), adaptado de Childs [43] (b).

### 2.3.3 Tipos e Formas de cavaco

De acordo com Klocke [21] os tipos de cavacos formados dependem diretamente do material usinado, da geometria da ferramenta e dos parâmetros de usinagem e podem resultar nos seguintes tipos de cavacos, considerando o grau de deformação ( $\epsilon$ ) conforme Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Tipos de cavacos.

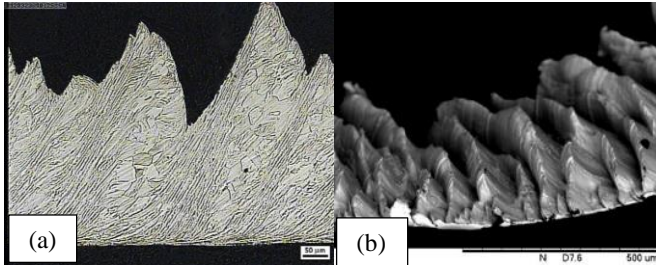
<p>Grau de deformação</p>	<p><math>\epsilon_0</math>: Grau de deformação na região do cisalhamento;  <math>\epsilon_1</math>: No limite elástico;  <math>\epsilon_2</math>: No limite de resistência;  <math>\epsilon_3</math>: No limite de ruptura.</p>	
<p>Contínuo  <math>\epsilon_2 &gt; \epsilon_0</math></p>	<p>Materiais com capacidade de deformação suficientemente elevada, a estrutura na região do cavaco é regular e as deformações não levam a encruamentos acentuados.</p>	
<p>Lamelar  <math>\epsilon_2 &lt; \epsilon_0 &lt; \epsilon_3</math></p>	<p>Quando a estrutura do material é irregular ou quando vibrações levam a variações na espessura do cavaco. Podem ocorrer em grandes avanços e/ou altas velocidades de corte.</p>	
<p>Segmentado  <math>\epsilon_3 &lt; \epsilon_0</math></p>	<p>Cavacos que são seccionados na região de cisalhamento e se unem através de caldeamento, ocorrem quando a deformação do material produz um encruamento acentuado na estrutura do material.</p>	
<p>Arrancado</p>	<p>Ocorre na usinagem de materiais frágeis com estrutura irregular, os cavacos são arrancados da superfície e a superfície da peça é muitas vezes danificada por microlascamentos.</p>	

FONTE: Adaptado de Klocke [21].

Os cavacos de aço inoxidável são geralmente segmentados, ou seja, possuem grandes deformações continuadas em estreitas bandas de deformação em segmentos [3, 4, 21]. A Figura 2.20(a) mostra a microestrutura de um cavaco segmentado de aço inoxidável austenítico AISI 304. É visível sua morfologia segmentada e regiões de intensa deformação das bandas de cisalhamento estão bem definidas em sua microestrutura [20]. A Figura 2.20(b) mostra uma imagem de um cavaco

segmentado de um aço inoxidável AISI 304 obtida através de microscopia eletrônica de varredura, onde se pode observar as bandas de cisalhamento e as lamelas [38].

Figura 2.20 – Cavaco segmentado.



FONTE: (a) Chagas [20] (b) Naves [38].

De acordo com a norma ISO 3685 [44], as formas de cavaco podem ser classificadas, conforme a Figura 2.21.

Figura 2.21 – Classificação dos cavacos.

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- Connect.		
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			

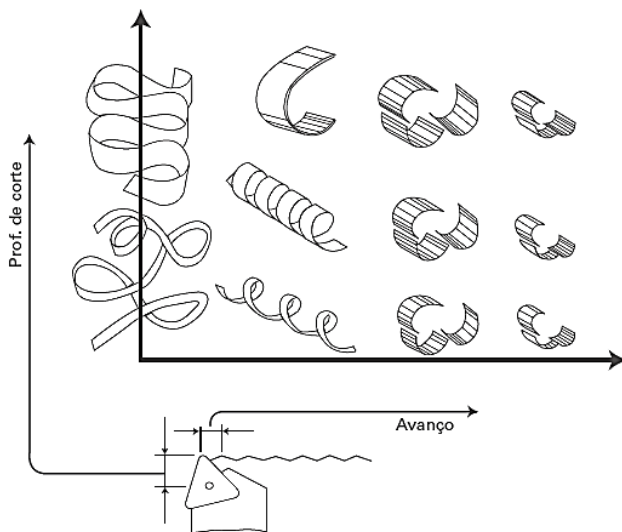
Fonte: Norma ISO 3685 [44].



O cavaco em fita é indesejado, pois ocupa um grande espaço, dificultando seu transporte além do risco de acidentes para o operador. O cavaco em lascas é desejável quando o cavaco necessita ser removido por fluido ou quando há pouco espaço disponível. O cavaco helicoidal geralmente é o mais conveniente [45].

A forma do cavaco está diretamente ligada à plasticidade do material, à configuração geométrica do corte (peça e ferramenta) e às condições de corte. Em geral a forma do cavaco é afetada pelo avanço e pela velocidade de corte. Um aumento da velocidade de corte ou a redução do avanço tendem a mover a forma do cavaco à esquerda da Figura 2.22 e produzir cavacos em fitas, sendo que o avanço é o parâmetro que mais influencia na forma do cavaco. A profundidade de corte tem uma influência em proporção menor que o avanço na forma do cavaco [4].

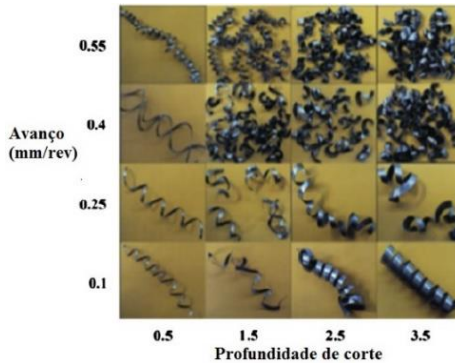
Figura 2.22 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.



Fonte: Machado [4].

Koyee *et al.* [46] compararam um aço inoxidável austenítico EN 14404 com dois aços inoxidáveis duplex, e mostraram que o aço inoxidável austenítico produz menos cavacos em fita, emaranhados e helicoidais em relação aos aços inoxidáveis duplex testados. Os cavacos do aço inoxidável austenítico EN 14404 são apresentados na Figura 2.23.

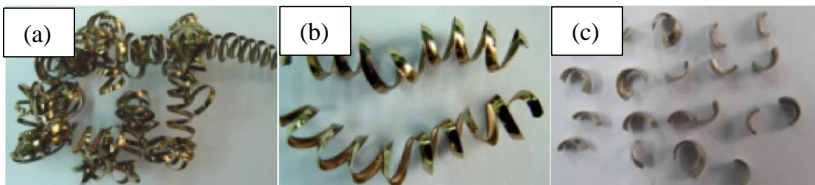
Figura 2.23 – Cavacos de um aço inoxidável austenítico EM 14404 usinados com  $v_c$  de 100 m/min.



Fonte: Adaptado de Koyee [46].

Noordin *et al.* [34] usinaram um aço inoxidável martensítico com uma composição de 0,38% C, 0,5% Mn, 0,9% Si, 13,6% Cr e 0,3% V, comparando uma ferramenta de metal-duro com uma de cermet. A Figura 2.24 mostra os cavacos após a usinagem com a ferramenta de metal-duro, verificando-se uma forte influência do avanço sobre a forma dos cavacos. Segundo os autores a ferramenta de cermet apresentou resultados semelhantes.

Figura 2.24 – Forma dos cavacos de um aço inoxidável martensítico usinado com (a)  $v_c = 100$  m/min,  $f = 0,09$  mm; (b)  $v_c = 130$  m/min,  $f = 0,16$  mm; (c)  $v_c = 100$  m/min,  $f = 0,28$  mm.

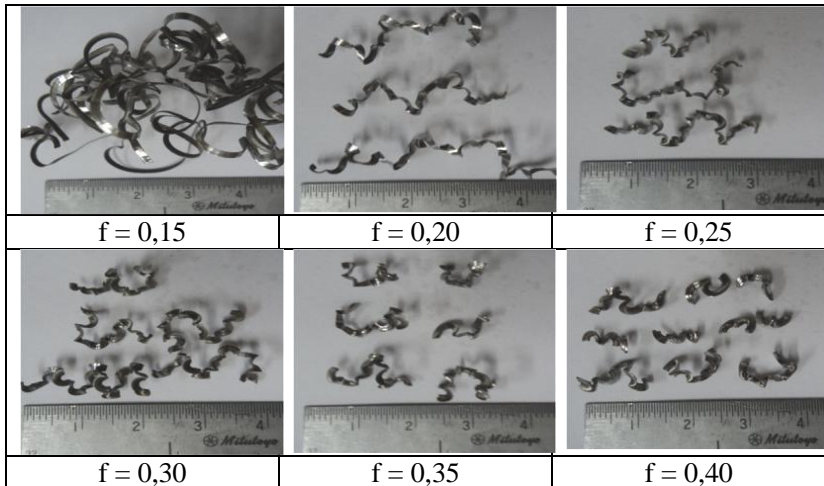


Fonte: Noordin [34].

Corrêa [12] avaliou a forma dos cavacos usinando um aço inoxidável S41426 com uma ferramenta de metal-duro, variando o avanço (0,15 mm – 0,4 mm) e mantendo constante a velocidade de corte (150 m/min) e profundidade de corte (1 mm). Segundo o autor, o cavaco

apresentou o tipo fita emaranhado para o avanço de 0,15 mm e os demais cavacos apresentaram a aparência de arcos conectados, mostrando a tendência de se produzir cavacos mais curtos com o aumento do avanço. A Figura 2.25 mostra os resultados obtidos.

Figura 2.25 – Variação do tipo de cavaco de um aço inoxidável supermartensítico S41426 em função do avanço usinado com  $v_c = 150$  m/min.



Fonte: Adaptado de Corrêa [12].

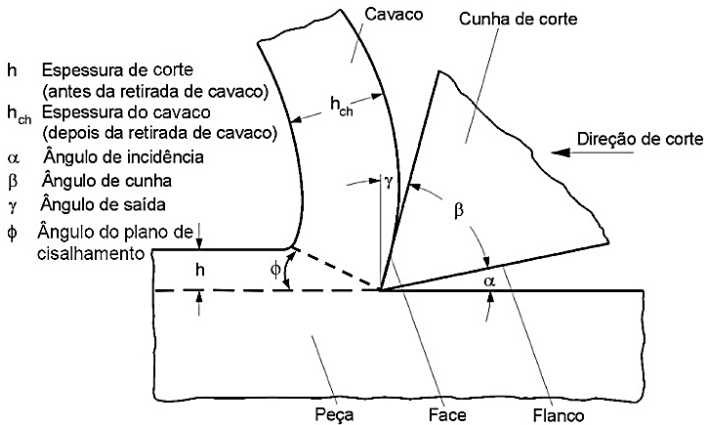
### 2.3.4 Grau de recalque do cavaco

A espessura do cavaco durante a usinagem não é determinada apenas pela geometria da ferramenta e pela espessura do material a ser usinado, mas também pelas condições do contato existentes na interface cavaco-ferramenta e pelas deformações plásticas que o material sofre na zona de cisalhamento [21, 45]. O grau de recalque é uma medida da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco e pode ser usado para calcular o ângulo de cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco. Do modelo de corte ortogonal pode-se definir o grau de recalque ( $R_c$ ) como a razão entre a espessura do cavaco ( $h_{ch}$ ) e a espessura do corte ( $h$ ) conforme Equação 2.1.

$$R_c = \frac{h_{ch}}{h} \quad (\text{Equação 2.1})$$

A Figura 2.26 ilustra a Equação 2.1.

Figura 2.26 – Formação do cavaco.



Fonte: adaptado de Klocke [21].

A espessura de corte é definida pela Equação 2.2 sendo  $f$  o avanço e  $\chi$  o ângulo de direção do gume.

$$h = f \times \text{sen } \chi \quad (\text{Equação 2.2})$$

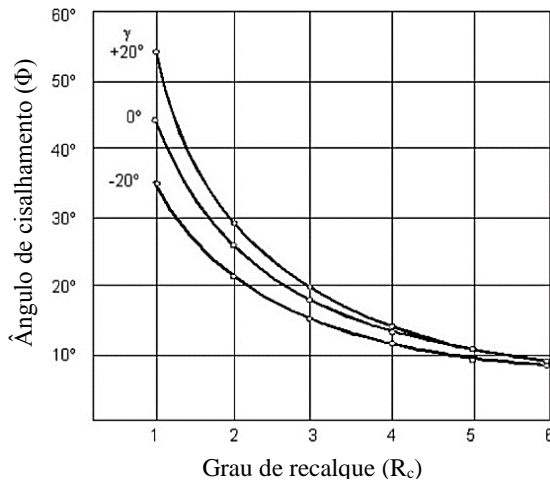
O cavaco não possui espessura uniforme, sendo necessária uma simplificação para assumir uma seção transversal retangular. A espessura do cavaco ( $h_{ch}$ ) é maior que a espessura de corte ( $h$ ) devido à restrição na superfície de saída da ferramenta por onde o cavaco escoar, gerando uma desaceleração do material que resulta na deformação do cavaco [3, 21].

O ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ) que pode ser determinado segundo a Equação 2.3, sendo  $\gamma$  o ângulo de saída da ferramenta.

$$\text{tg } \phi = \frac{\cos(\gamma)}{Rc - \text{sen}(\gamma)} \quad (\text{Equação 2.3})$$

A relação entre o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento para três valores de ângulo de saída é mostrado na Figura 2.27. Pode-se verificar uma diminuição do ângulo de cisalhamento com o aumento do grau de recalque e um aumento no ângulo de cisalhamento com o aumento do ângulo de saída da ferramenta.

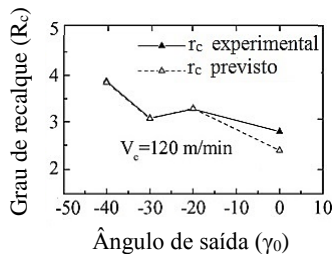
Figura 2.27 – Relação entre grau de recalque e ângulo de cisalhamento ao usinar um aço SAE 1035 ( $v_c = 100$  m/min;  $a_p = 0,3$  mm;  $f = 0,2$  mm).



Fonte: Kronenberg [47].

Fang [48] usinou uma liga de chumbo com ferramenta de metal-duro e verificou que quanto maior o ângulo  $\gamma_o$  menor é o  $R_c$ , devido à maior facilidade para o material escoar sobre a face da ferramenta, conforme Figura 2.28.

Figura 2.28 – Relação do grau de recalque com ângulo de saída em uma liga de chumbo ( $a_p = 0,5$  mm;  $f = 0,3$  mm).

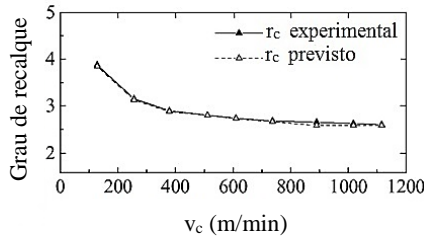


Fonte: Fang [48].

Fang [48] verificou que com o aumento da velocidade de corte menor é o  $R_c$ , isso ocorre porque a quantidade de calor gerada diminui, pois a força de corte diminui. Com o aumento da velocidade de corte muda

a distribuição de calor na raiz de cavaco, com isso menos calor é conduzido para a peça e para a ferramenta e maior quantidade de calor permanece na raiz do cavaco, aumentando a temperatura na região de cisalhamento e a temperatura do cavaco, conforme Figura 2.29.

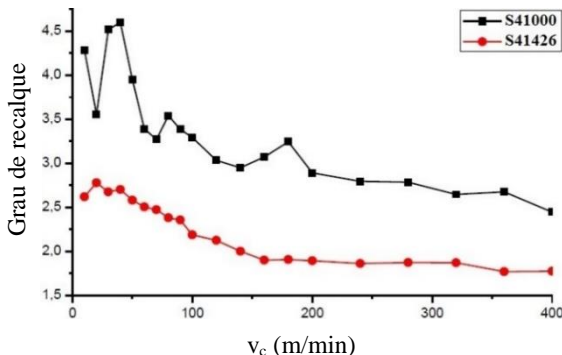
Figura 2.29 – Relação da velocidade de corte com o grau de recalque em uma liga de chumbo ( $a_p = 0,5$  mm;  $f = 0,3$  mm).



Fonte: Fang [48].

Corrêa [12] usinou um aço inoxidável martensítico (S41000) e um aço inoxidável supermartensítico (S41426) com uma ferramenta de metal-duro, mantendo o avanço (0,2 mm) e a profundidade de corte (1 mm) constantes e variando apenas a velocidade de corte (10 – 400 m/min). Para ambos os materiais o autor observou que o aumento da velocidade de corte diminuiu o grau de recalque, sendo que entre 20 a 40 m/min houve um aumento do grau de recalque, fato possivelmente ligado à presença de gume postigo, conforme Figura 2.30.

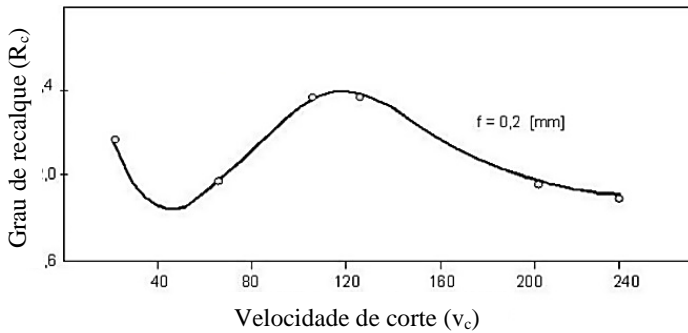
Figura 2.30 – Variação do grau de recalque em função da velocidade de corte ( $a_p = 1$  mm;  $f = 0,2$  mm).



Fonte: Corrêa [12].

Micheletti [49] verificou a relação da velocidade de corte com o grau de recalque na usinagem de um aço carbono AISI 1040. No estudo foi obtido um valor máximo do grau de recalque numa faixa próxima de 120 m/min, e a partir deste ponto o aumento da velocidade de corte diminuiu o grau de recalque conforme Figura 2.31. Para o autor a presença de gume postiço pode ser responsável por esse comportamento da curva.

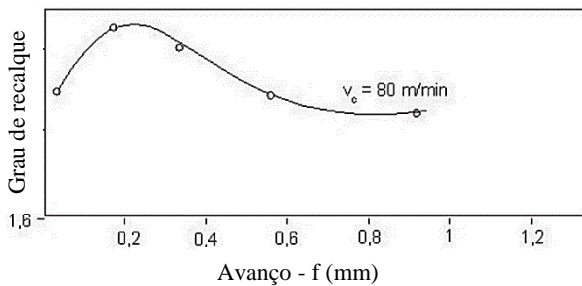
Figura 2.31 – Relação entre a velocidade de corte e o fator de recalque ao usinar um aço AISI 1040.



Fonte: Micheletti [49].

Também foi verificada a relação do avanço com o grau de recalque ( $R_c$ ). Para avanços em torno de 0,2 mm o grau de recalque atinge um valor máximo e tende a diminuir com o aumento do avanço [49], conforme Figura 2.32.

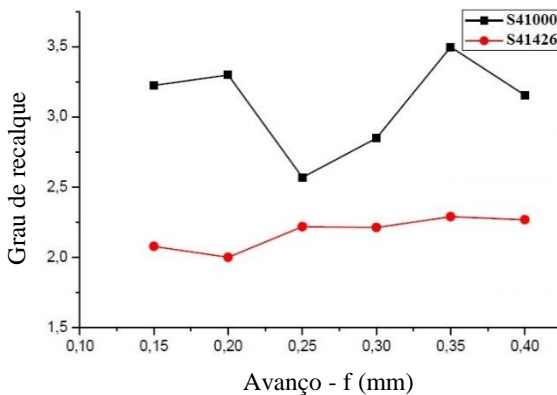
Figura 2.32 – Relação entre o avanço e o fator de recalque ao usinar um aço AISI 1040.



Fonte: Micheletti [49].

Corrêa [12] avaliou o efeito do avanço sobre o grau de recalque ao usinar um aço inoxidável martensítico (S41000) e um aço inoxidável supermartensítico (S41426) com uma ferramenta de metal-duro, mantendo constante a velocidade de corte (150 m/min) e a profundidade de corte (1 mm) e variando o avanço (0,15 – 0,40 mm). Para ambos os materiais o aumento da velocidade de corte acarretou uma diminuição no grau de recalque, sendo que entre 20 a 40 m/min houve um aumento do grau de recalque, fato possivelmente ligado à presença de gume postiço, conforme Figura 2.33.

Figura 2.33 – Relação entre a profundidade de corte e o grau de recalque.



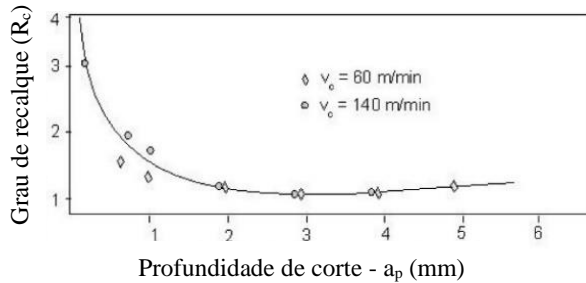
Fonte: Corrêa [12].

Micheletti [49] verificou o efeito da profundidade de corte no valor de  $R_c$ , conforme Figura 2.34. Nesta verifica-se que o valor de  $R_c$  é grande para pequenos valores de profundidade de corte, porém o valor de  $R_c$  tende a diminuir até uma profundidade de corte de 2 mm e após isto tende a se estabilizar.

O material da ferramenta também tem influência no valor de  $R_c$ . Kronenberg [47] usinou cobre com uma ferramenta de diamante e outra de metal-duro, obtendo um valor de  $R_c$  de aproximadamente 7 e 1,8 respectivamente. Outro estudo do mesmo autor revela a influência do material da peça no  $R_c$ , com uma ferramenta de metal-duro ( $v_c = 70\text{m/min}$ ,  $a_p = 1,5\text{mm}$ ,  $f = 0,1\text{ mm}$  e  $\gamma = 5^\circ$ ). Usinando cobre e um aço AISI 1035 o  $R_c$  para o cobre foi próximo a 7, diferente do aço carbono AISI 1035 que nas mesmas condições de usinagem teve um  $R_c$  próximo a 2,8.



Figura 2.34 – Relação entre a profundidade de corte e o grau de recalque ao usinar um aço AISI 1040.

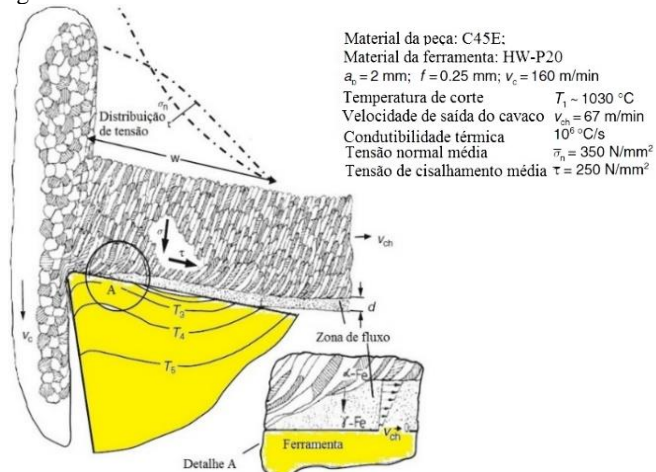


Fonte: Micheletti [49].

### 2.3.5 Zona de Fluxo

Zona de fluxo é uma zona de cisalhamento intensa que é bem próxima mas não necessariamente na interface cavaco-ferramenta. Na presença de uma zona de fluxo, ocorre uma mudança no mecanismo de deformação plástica onde o fenômeno da recristalização é associado ao movimento de discordâncias, resultando na formação de grãos equiaxiais e novos contornos de grão [3]. A Figura 2.35 mostra de forma esquemática a presença da zona de fluxo na interface cavaco ferramenta.

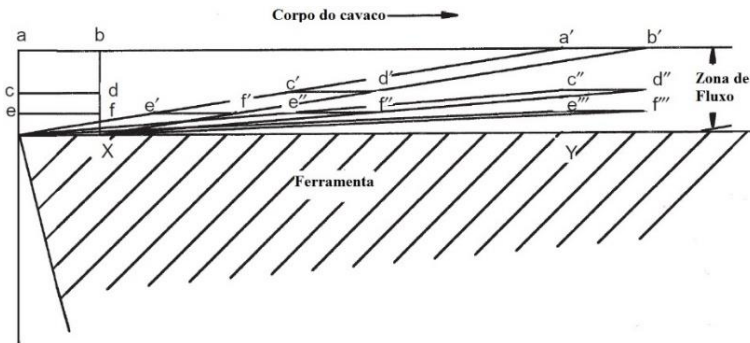
Figura 2.35 – Zona de fluxo na interface cavaco ferramenta.



Fonte: Klocke [21].

Na zona de fluxo o material sofre grandes deformações, Trent e Wright [3] apresentam um modelo de deformação na zona de fluxo, conforme Figura 2.36, no qual a deformação cisalhante na zona de fluxo é inversamente proporcional à distância da superfície de saída.

Figura 2.36 – Modelo de deformação na zona de fluxo.



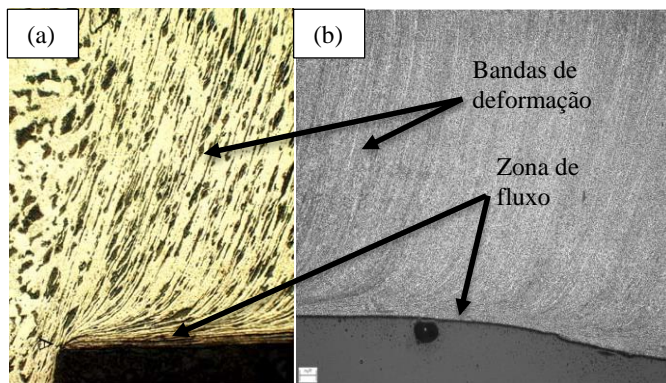
Fonte: Adaptado de Trent e Wright [3].

Essa zona é fortemente ligada à ferramenta de corte, sendo que a velocidade relativa do cavaco em relação à face da ferramenta tende a zero. A movimentação do cavaco sobre a face da ferramenta ocorre pela elevada deformação plástica e fratura do material na zona de fluxo [3].

Teoricamente a deformação cisalhante seria infinita na face da ferramenta, porém o fluxo laminar é interrompido a poucos micrometros da superfície devido à rugosidade da ferramenta. A capacidade dos metais e suas ligas de suportar estes níveis de deformação cisalhantes sem se romper se deve às altíssimas tensões de compressão e elevadas temperaturas durante o processo [4]. A presença de Cromo, Níquel e Molibdênio nos aços inoxidáveis aumenta a temperatura na zona de fluxo [50].

A Figura 2.37(a) apresenta uma micrografia da zona de fluxo da raiz de um cavaco de aço AISI 1017, usinado a 45 m/min e com avanço de 0,191mm [42]. Ao usinar um aço inoxidável martensítico AISI 410 com uma  $v_c = 30$  m/min,  $a_p = 1$  mm e  $f = 0,2$  mm, Corrêa *et al.* [51] verificaram a presença da zona de fluxo e das bandas de deformação na região central do cavaco, conforme Figura 2.37(b).

Figura 2.37 – Micrografias da zona de fluxo.



Fonte: Chern [42](a), Corrêa *et al.* [51] (b).

Ribeiro *et al.* [39] mediram os valores da zona de fluxo ao usar alumínio, aço ABNT 304 e aço ABNT 1050 e concluíram que o material mais dúctil, alumínio, que possui um grau de deformação maior, apresentou maiores dimensões da zona de fluxo em comparação com o aço ABNT 1050. Os autores também observaram que o aumento do avanço favorece um aumento na zona de fluxo e que o aumento da velocidade de corte confina a deformação a zonas mais estreitas.

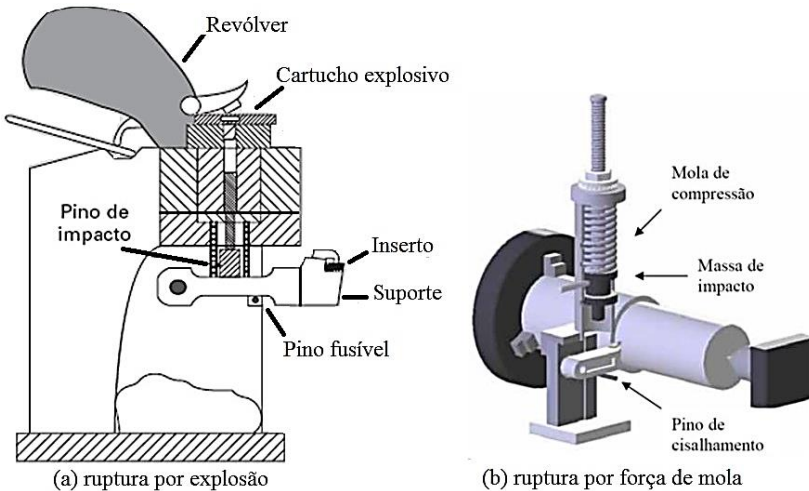
#### 2.4 QUICK-STOP DEVICE (QSD)

Dispositivos de parada rápida (QSD) são utilizados para “congelar” o corte e realizar a coleta de amostras das raízes do cavaco que são representativas da zona de deformação de corte primária, durante as condições de corte [52]. As amostras de raízes de cavaco, obtidas pelo método QSD, são cavacos parcialmente formados e aderidos ao corpo de prova [53]. A maioria das teorias modernas sobre a interface cavaco-ferramenta derivam de estudos baseados na utilização de dispositivos QSD [4]. Os maiores empecilhos para o desenvolvimento de uma teoria mais elaborada são as altas velocidades de saída do cavaco e as reduzidas áreas de contato cavaco-ferramenta [42].

O modelo de interrupção súbita do processo de corte *Quick-Stop Device* (QSD) utiliza uma fonte externa de energia para afastar a ferramenta da zona de corte por impacto, com uma grande aceleração, objetivando reduzir ao máximo o tempo entre o início e o final da

separação da ferramenta da raiz do cavaco, de forma a possibilitar a observação da formação do cavaco. Para avaliar a raiz do cavaco, a ferramenta deve ser removida do corte na direção da velocidade de corte efetiva e em uma velocidade maior que a velocidade de corte no momento da usinagem [5, 42, 54]. No equipamento QSD a ferramenta é apoiada sobre dois pinos. Um de cisalhamento e outro promovendo um eixo de rotação. Para retirar a ferramenta, o pino de cisalhamento deve ser rompido pela aplicação de uma força súbita sobre a ferramenta. A aplicação desta força pode ser promovida de diversas formas. A literatura mostra dispositivos nos quais a aplicação da força é promovida por um tiro (balística), pelo impacto de um martelo manual ou por um acionamento mecânico como, por exemplo, com uma mola de compressão. Na Figura 2.38 são representados o processo de romper o pino por uma explosão (a) e por um acionamento mecânico (b) [4, 5].

Figura 2.38 – Representação mostrando (a) modelo de ruptura do pino por explosão, (b) modelo de ruptura do pino por acionamento mecânico.

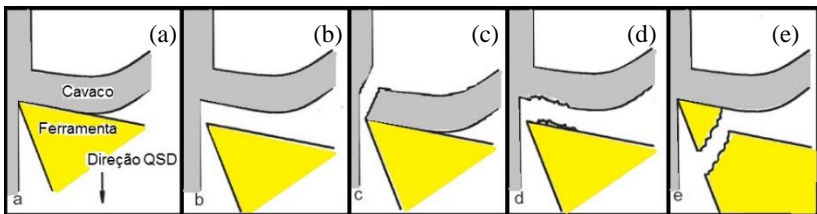


Fonte: (a)Machado [4], (b) Lucas [5].

Chern [42] desenvolveu um QSD somente mecânico, que não utiliza pinos de cisalhamento, com o qual ele usinou aço AISI 1017 a 45 m/min e, segundo o autor, obteve resultados satisfatórios realizando mais de 100 repetições do teste.

Lucas [5] desenvolveu um dispositivo QSD e o aplicou no estudo da formação do cavaco na usinagem de um ferro fundido nodular ferrítico. O sistema de acionamento da massa de impacto por mola possibilitou a obtenção de raízes de cavaco de 20 a 250 m/min com uma boa repetibilidade. Na Figura 2.39 é representado de forma esquemática a dinâmica de funcionamento de um QSD na raiz do cavaco e possíveis resultados dos testes [3]. Na Figura 2.39(a) mostra a direção em que a ferramenta deve se deslocar para interromper o corte; a Figura 2.39(b) é a situação ideal de extração da raiz do cavaco pelo QSD; Figura 2.39(c) o cavaco sai da peça e se une a ferramenta; Figura 2.39(d) uma parte do cavaco se adere à ferramenta e a Figura 2.39(e), a ferramenta quebra e fica aderida à peça na zona de formação do cavaco.

Figura 2.39 – Diagrama mostrando (a) modelo de ação do *Quick-Stop Device*, (b) - (e) situações que podem ocorrer nos testes.



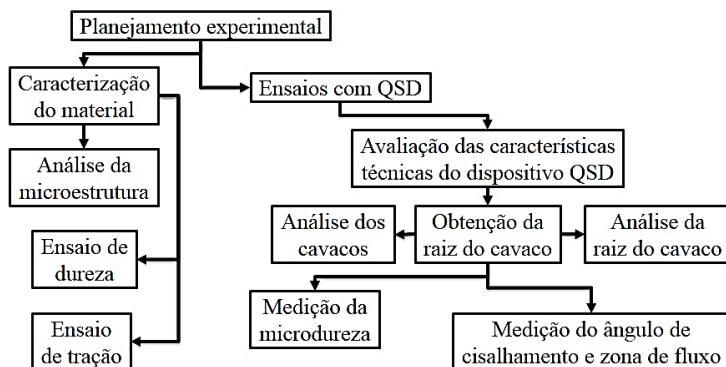
Fonte: Adaptado de Trent e Wright [3].



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão descritos os materiais e métodos necessários para a realização dos ensaios, bem como o planejamento e execução experimentais empregados. O fluxograma da Figura 3.1 mostra uma visão geral do procedimento dos experimentos, sendo divididos em caracterização do material e ensaios com QSD para obtenção da raiz do cavaco.

Figura 3.1 – Visão geral dos ensaios deste trabalho.



FONTE: Do autor.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ENSAIADOS

O material utilizado nos ensaios foi um aço inoxidável austenítico denominado UNS S30400 e um aço inoxidável supermartensítico denominado UNS S41426. Os materiais foram fornecidos em barras cilíndricas. A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de material utilizado nos ensaios.

Tabela 3.1 – Quantidade de material utilizado nos ensaios.

Material	Denominado	Quantidade de barras	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
A	UNS S30400	8	100	5
B	UNS S41426	5	125	5

FONTE: Do autor.

As composições químicas dos materiais utilizados na pesquisa foram fornecidas pelos fabricantes (UNS S30400 – Siderúrgica Riograndense; UNS S41426 – Villares Metals S.A.) e estão dispostas na Tabela 3.2. É importante salientar que pode ocorrer uma variação química pois todos os elementos estão dentro de uma faixa permissível e algumas variações não são controladas no processo de fabricação [7].

Tabela 3.2 – Composição química dos materiais.

Elemento de Liga	UNS S30400 (%)	UNS S41426 (%)
C	0,07	0,012
Cr	18,82	12,2
Ni	8,93	6
Mo	0,4	2
V	0,05	0,04
Ti	0,005	0,15
N	0,026	0,01
Si	0,5	0,25
Mn	1,75	0,5
P	0,042	0,015
S	0,021	0,001
Al	0,01	0,02
Nb	0,006	-
W	0,17	-
Cu	0,25	-
Mg	0,006	-

FONTE: Adaptado de Corrêa [12] e Gomes [55].

### 3.1.1 Análise da microestrutura

Para a análise da microestrutura foram retiradas amostras de seções transversais do UNS S30400 e do UNS S41426, lixadas na sequência decrescente de lixas com granulometria: 120, 200, 320, 600, 800, 1000, 1200. Entre cada granulometria de lixa, tomou-se o cuidado de limpar as amostras em banho de ultrassom em álcool etílico 95% evitando que grãos abrasivos da lixa anterior contaminassem a lixa com granulometria mais fina, evitando assim riscos na superfície a ser analisada. Após o lixamento as amostras foram polidas com pasta de diamante com granulometria: 3 µm e 1 µm.



Depois do polimento as amostras foram atacadas com o reagente Glicerina + Água Régia (15 ml HCl + 10 ml Glicerol + 5 ml HNO<sub>3</sub>) com um tempo de ataque de 4 minutos, para revelar os contornos dos grãos. As micrografias das superfícies foram feitas com um microscópio Óptico Leica DM4000M do Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM) da UFSC.

### 3.1.2 Ensaios de Dureza

Para obter a dureza dos materiais foi cortada uma seção da barra de cada tipo de material e posteriormente as amostras foram faceadas para melhor visualização da indentação. Após isto foram realizadas medições nas seções transversais do UNS S30400 e do UNS S41426. O equipamento utilizado foi um microdurômetro SHIMADZU modelo HMV 2000 do Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) aplicando uma carga nas amostras de 2,9N com um tempo de indentação de 10 segundos. Foram feitas 10 indentações na amostra.

O objetivo desse ensaio foi caracterizar a dureza dos materiais ao longo de suas seções transversais. O espaçamento entre as indentações foi de no mínimo 3 vezes a diagonal das indentações. Foram consideradas as normas ABNT NBR ISO 6507-1:2008 [56] e NBR ISO ISO 6508-1:2008 [57].

### 3.1.3 Ensaio de Tração

Devido ao material da pesquisa ser o mesmo material utilizado nos trabalhos desenvolvidos por Corrêa [12] (UNS S41426) e Gomes [55] (UNS S30400), estes materiais já sofreram ensaios de tração, sendo os resultados apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ensaio de tração.

Características	UNS S30400		UNS S41426	
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$
Tensão de escoamento (MPa)	358,80	16,70	638,11	37,96
Tensão de ruptura (MPa)	599,95	9,55	858,85	22,22
Alongamento (%)	64,5	0,79	20,08	4,55

FONTE: Adaptado de Corrêa [12] e Gomes [55].

### 3.2 TIPO DE OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO

A operação de torneamento empregada neste trabalho foi o torneamento cilíndrico externo (vide item 2.2.2) que consiste em dar um formato cilíndrico à peça em rotação. Todos os ensaios de torneamento foram realizados sem lubrificarrefrigeração.

### 3.3 MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta utilizada para os ensaios com o dispositivo QSD foi um torno universal modelo I-45 (Figura 3.2), fabricado pela Indústrias ROMI S.A., com distância entre pontas de 2000 mm, com um diâmetro admissível sobre o barramento de 620 mm. O torno possui uma potência de 14,7 kW, com um torque admissível de 12750 N.m, com uma gama de velocidades de rotação entre 20 e 2500 rpm, com avanços longitudinais entre 0,05 a 18 mm e avanços transversais entre 0,017 a 6 mm. A máquina-ferramenta está instalada no Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON) da UFSC.

A velocidade de corte foi controlada por intermédio de um tacômetro foto/contato digital da marca Mimipa modelo MDT-2238<sup>a</sup>, que apresenta uma faixa de medição de 2,5 a 99999 rpm, com uma precisão da leitura de  $\pm 0,05\%$ .

Figura 3.2 – Dispositivo QSD montado no Torno Romi I-45.



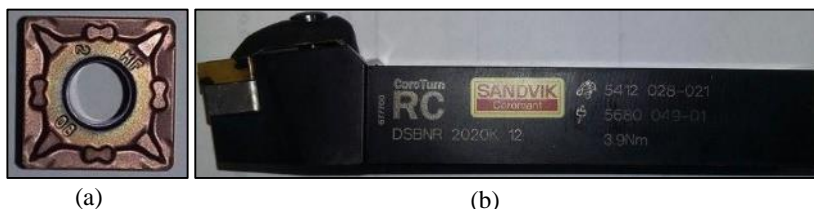
FONTE: Do autor.

### 3.4 FERRAMENTA DE CORTE E PORTA FERRAMENTA

A ferramenta utilizada para usinagem foi um inserto de metal-duro com um revestimento de AlTiCrN depositado por PVD para melhorar sua resistência ao desgaste. O inserto utilizado possui geometria SNMG 12 04 08 – MF 1125 da fabricante Sandvik Coromant. A escolha da ferramenta foi baseada em recomendações da literatura e da disponibilidade de ferramentas. A Figura 3.3(a) mostra a ferramenta de corte utilizada.

O suporte da ferramenta é da marca Sandvik Coromant código DSBNR 2020K 12 e apresenta a seguinte geometria: ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) de  $-6^\circ$ ; ângulo de folga ( $\alpha_o$ ) de  $6^\circ$ ; ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) de  $-6^\circ$ ; ângulo de posição primária ( $\kappa_r$ ) de  $75^\circ$ . O ângulo de quina ( $E_r$ ) de  $90^\circ$ ; raio de quina da ferramenta ( $r_f$ ) 0,8 mm. A Figura 3.3(b) mostra o suporte da ferramenta utilizado.

Figura 3.3 – (a) Ferramenta de corte; (b) Suporte da ferramenta.



FONTE: Do autor.

### 3.5 DISPOSITIVO QSD

O estudo do mecanismo de formação do cavaco foi realizado com o auxílio do dispositivo QSD desenvolvido no escopo do trabalho de doutorado de Lucas [5], disponível no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da UFSC.

Para avaliar a raiz do cavaco a ferramenta deve ser retirada da zona de corte com uma velocidade maior que a velocidade de corte empregada. O dispositivo QSD (Figura 3.4) empregado assegura uma boa repetitividade da parada brusca do corte devido a sua concepção de projeto que emprega uma massa acelerada por um acionamento mecânico por mola de compressão.

Figura 3.4 – Dispositivo QSD desenvolvido por Lucas.

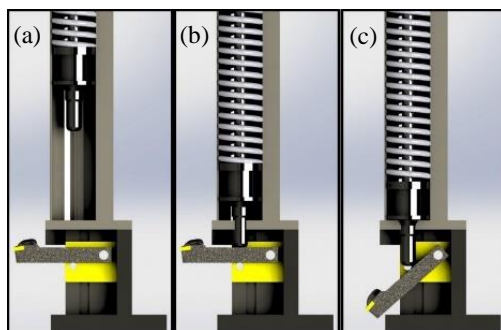


FONTE: Do autor.

### 3.5.1 Sistema de acionamento mecânico

O sistema de propulsão da massa de impacto do dispositivo QSD empregado é uma mola de compressão que tem a função de armazenar energia. Ao ser liberada esta energia promove a aceleração da massa de impacto. A massa de impacto, ao atingir a ferramenta transfere sua energia cinética para a ferramenta de corte, rompendo o pino de cisalhamento e acelerando a ferramenta em torno de um eixo articulado. Desta forma o gume da ferramenta sai da região de contato com uma velocidade maior que a velocidade de corte. A Figura 3.5 mostra esquematicamente os diferentes estágios de funcionamento do QSD. Em (a) a mola está comprimida, em (b) a massa de impacto atinge o suporte da ferramenta e em (c) o suporte da ferramenta em sua posição limite depois da ruptura do pino de cisalhamento.

Figura 3.5 – Mola tensionada (a), momento do impacto do martelo no suporte (b), ferramenta fora da zona de corte (c).



FONTE: Do autor.

O tubo no qual a mola e a massa de impacto estão inseridos tem a finalidade de direcionar a massa de impacto sobre o suporte da ferramenta, bem como garantir a segurança da operação. Para comprimir a mola, uma barra roscada é fixada na massa de impacto e a seguir esta é tracionada por uma porca montada sobre um rolamento de encosto na parte superior do dispositivo. O dispositivo QSD pode ser regulado para cinco intensidades de disparo, conforme Tabela 3.4.

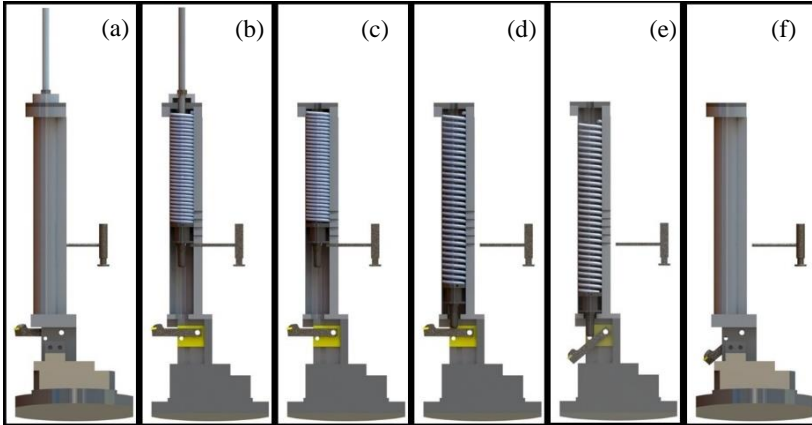
Tabela 3.4 – Tabela das intensidades de compressão da mola no QSD (tamanho da mola sem compressão = 430 mm).

Dispositivo QSD	Compressão da mola
Intensidade 1	150 mm
Intensidade 2	165 mm
Intensidade 3	180 mm
Intensidade 4	195 mm
Intensidade 5	210 mm

FONTE: Do autor.

Após a mola ser comprimida a massa de impacto é travada por uma trava e a barra roscada é retirada da massa de impacto. O dispositivo é disparado quando se retira a trava. A Figura 3.6 representa o sistema de compressão da mola e disparo.

Figura 3.6 – Mola tensionada no dispositivo (a), vista em corte da mola tensionada (b), retirada da barra roscada e rolamento (c), retirada do gatilho e massa disparada (d), ruptura do pino de cisalhamento e saída da ferramenta da zona de formação do cavaco (e), dispositivo após ser disparado (f).



FONTE: Do autor.

O dispositivo foi projetado pra atender as demandas de parada brusca até velocidades de corte de 240 m/min. É necessário que a velocidade da quina da ferramenta seja maior que a velocidade de corte utilizada nos ensaios (220 m/min). Para atingir esta velocidade, e para isto a massa de impacto deve transferir o máximo de energia para a o suporte da ferramenta. A parcela de energia não transferida para a ferramenta deve ser absorvida pela estrutura do dispositivo.

Como fator de otimização, a massa de impacto e a massa do suporte da ferramenta devem ser concentradas no menor volume possível e devem ser iguais para prevalecer as condições de choque elástico. A direção da massa de impacto e da ferramenta devem ser coincidentes após o impacto.

Para os próximos cálculos são consideradas algumas simplificações do sistema: a massa da mola é desprezada, tanto a massa de impacto quanto a massa da ferramenta são concentradas no ponto de impacto, ocorre um choque elástico, a massa de impacto adere à massa do suporte e o conjunto se desloca mantendo a quantidade de movimento.

A mola apresenta seguintes características: constante  $K=15 \text{ N/mm}$ , comprimida a 150 mm (intensidade 1), diâmetro do arame 8 mm, diâmetro externo 52 mm, número de espiras 30 e altura 430 mm.

Com a Equação 3.1 é obtida a energia acumulada na mola, e com a Equação 3.2 a energia cinética que a massa de impacto recebe da mola:

$$E_{mola} = \frac{1}{2}K \times d^2 \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$E_{cinética} = \frac{1}{2}m_p \times v_p^2 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

$K$  = constante elástica da mola (15000 N/m)

$d$  = deslocamento sofrido pela mola (0,15 m)

$m_p$  = massa de impacto (0,5 kg)

$v_p$  = velocidade da massa de impacto (m/s)

Igualando as Equações 3.1 e 3.2 obtêm-se a velocidade da massa de impacto  $v_p = 26\text{m/s}$ .

Como em um choque elástico a energia cinética da massa de impacto é transferida para o suporte da ferramenta, isto gera uma igualdade entre a energia cinética da massa de impacto e a energia cinética da massa do suporte da ferramenta, conforme Equação 3.3, resultando em uma velocidade de saída do suporte da ferramenta de aproximadamente 26m/s. Se a massa de impacto for muito pequena em relação à massa do suporte, ela sofrerá uma reação ao choque elástico, retornando em velocidade igual e em sentido contrário. Caso a massa de impacto for maior que a massa do suporte, a massa continua se deslocando, e a massa de impacto é acrescida à massa do suporte. Se as massas forem aproximadamente iguais prevalecem as condições de choque elástico.

$$\frac{1}{2}m_p \times v_p^2 = \frac{1}{2}m_{th} \times v_{th}^2 \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

$v_t$  = velocidade de retração da ferramenta (m/s)

$m_p$  = massa de impacto (kg)

$v_p$  = velocidade da massa de impacto (m/s)

$m_{th}$  = massa do suporte da ferramenta (kg)

$v_{th}$  = velocidade do suporte da ferramenta (m/s)

Considerando que a massa de impacto e a massa do suporte são iguais (0,5 kg) e a velocidade do suporte da ferramenta ( $v_{th}$ ) no momento do impacto é igual a 0, pode-se calcular a velocidade de retração da ferramenta pela Equação 3.4 obtendo-se um resultado de velocidade de retração ( $v_t$ ) de 13 m/s. Considerando que as equações empregadas são para sistemas ideais e que uma parcela de energia é necessária para romper o pino de cisalhamento, Lucas [5] estimou um fator de perda de  $\eta = 40\%$  quando desenvolveu este dispositivo.

$$(m_p \times v_p) + (m_{th} \times v_{th}) = (m_p + m_{th}) \times v_t \quad (\text{Equação 3.4})$$

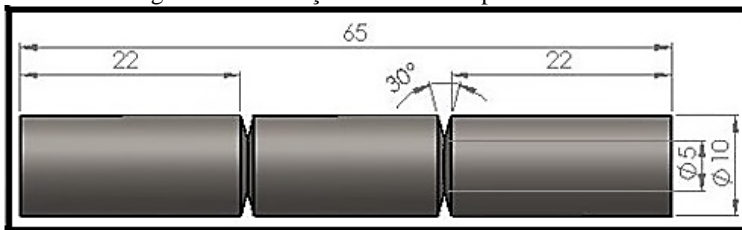
Os ensaios de parada brusca para obtenção da raiz do cavaco preveem o emprego de velocidades de corte de 20 m/min, 120 m/min e 220 m/min, sendo estes valores abaixo da velocidade limite estabelecido no projeto do QSD [5].

### 3.5.2 Pino de cisalhamento

Na utilização do QSD o pino de cisalhamento tem um papel fundamental no processo. Ele deve suportar os esforços que atuam sobre a ferramenta no momento da usinagem e deve romper-se com a colisão da massa de impacto sobre o suporte da ferramenta.

A Figura 3.7 mostra um esboço do pino de cisalhamento.

Figura 3.7 – Esboço ilustrativo do pino utilizado.



FONTE: Do autor.

O pino de cisalhamento deve apresentar uma deformação plástica mínima para não comprometer o posicionamento da ferramenta e possuir uma resistência mecânica para que a fratura só ocorra diante da ação da massa de impacto. O pino possui dois entalhes em V para concentrar a tensão e garantir a ruptura frágil no momento de impacto. O pino foi usinado em aço ABNT 1045, temperado em água, após ser aquecido por

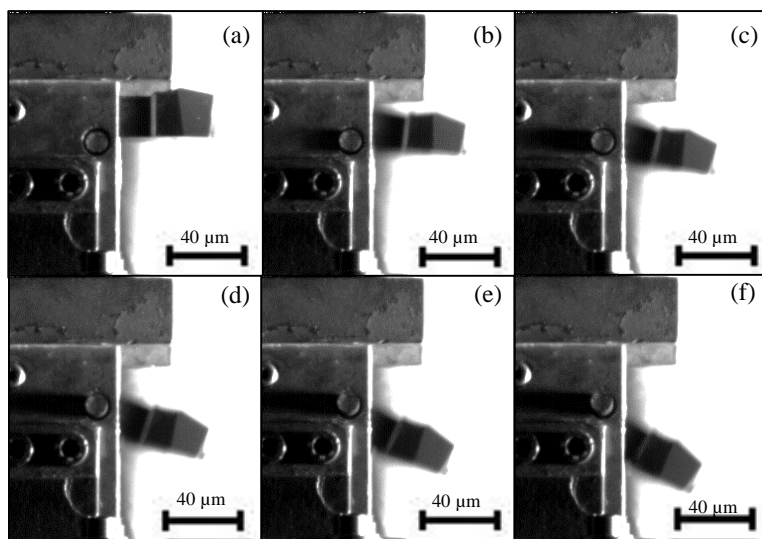


1 hora a 850°C em um forno mufla da marca Jung disponível no Laboratório de Conformação (LABCONF). O tratamento térmico elevou a dureza dos pinos de 20 HRC para 51 HRC.

### 3.5.3 Determinação da velocidade de retração da ferramenta

Para determinar a velocidade de retração da ferramenta foi utilizada uma câmera de alta velocidade da marca FASTEC IMAGING (EUA), modelo HiSpec 4, e um conjunto de lentes com distância focal objetiva de 200 mm, ambos disponibilizados pelo Laboratório de Metrologia e Automação (LABMETRO). A Figura 3.8 mostra um exemplo de uma sequência de imagens obtidas pela câmera durante as filmagens.

Figura 3.8 – Sequência de imagens durante a retração da ferramenta, com diferença de 1 ms; 0 ms (a); 1 ms (b); 2 ms (c); 3 ms (d); 4 ms (e); 5 ms (f);



FONTE: Do autor.

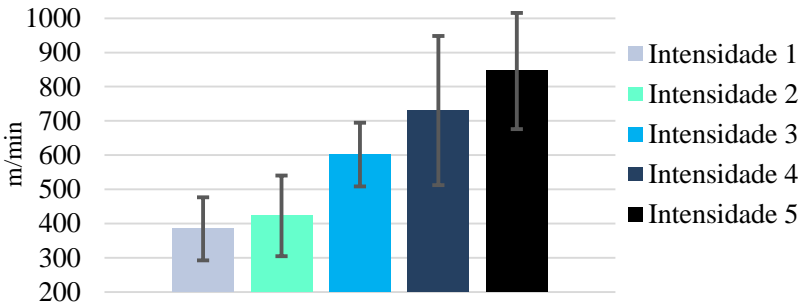
Após a montagem do dispositivo QSD no torno, a câmera foi posicionada a uma distância constante (1,5m) em todos os ensaios para garantir precisão de foco e repetibilidade das medições. Foi montado um sistema de iluminação com um refletor de 500 W (watts) e um papel branco ao fundo do suporte da ferramenta para melhorar o contraste da filmagem.

A câmera foi configurada com uma taxa de 1000 quadros/segundo. A análise de imagens foi realizada com o *software* HiSpec Control Software e as medições de deslocamento do suporte da ferramentas foram realizadas com o auxílio do *software* SolidWorks.

Foram realizadas quatro filmagens para cada uma das cinco intensidades de disparo que o QSD possui, sendo os resultados individuais apresentados no Apêndice A.

Os ensaios foram realizados sem que o processo de usinagem estivesse sendo realizado. Conforme mostra a Figura 3.9 a intensidade 1 apresentou uma velocidade de retração da ferramenta média ( $v_{mr}$ ) de 384,8 m/min e desvio padrão ( $\sigma$ ) de 92,1; a intensidade 2 apresentou  $v_{mr}$  de 422,3 m/min e  $\sigma$  de 118,1; a intensidade 3 apresentou  $v_{mr}$  de 601,8 m/min e  $\sigma$  de 92,8; a intensidade 4 apresentou  $v_{mr}$  de 730,4 m/min e  $\sigma$  de 218,3 e a intensidade 5 apresentou  $v_{mr}$  de 845,8 m/min e  $\sigma$  de 170,1.

Figura 3.9 – Velocidade de saída da ferramenta no dispositivo QSD sem usinagem.



FONTE: Do autor.

### 3.6 ENSAIOS COM DISPOSITIVO QSD

O dispositivo QSD possui uma inclinação de  $7^\circ$  para evitar o contato do gume da ferramenta na peça durante a interrupção do corte. Com a ferramenta montada, tal inclinação modifica a geometria da ferramenta em relação ao ângulo de saída ( $\gamma_o$ ), que passa de  $-6^\circ$  para  $-13^\circ$  com a ferramenta montada no dispositivo QSD.

As condições de corte utilizadas nos testes de *quick-stop device* são mostradas na Tabela 3.5. Esses valores foram determinados após alguns pré-testes, nos quais a rigidez do sistema foi uma variável fundamental para se chegar a estes valores.

Tabela 3.5 – Condições utilizadas nos testes de QSD.

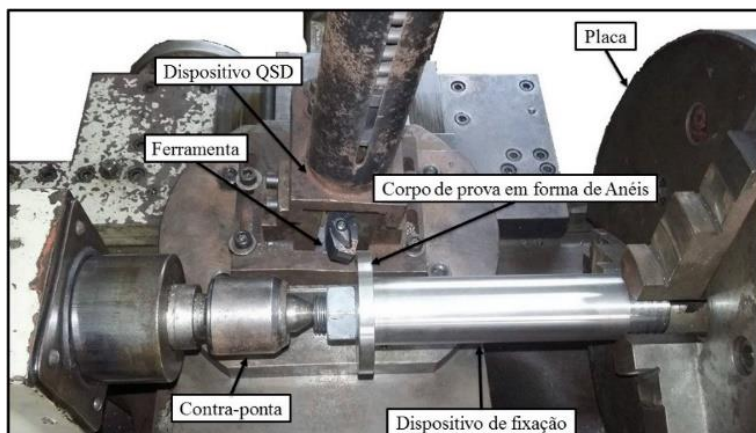
$v_c$ (m/min)	$f$ (mm)	$a_p$ (mm)
20	0,1	2
120		
220		
20	0,2	
120		
220		

FONTE: Do autor.

### 3.6.1 Obtenção da raiz do cavaco

Os corpos de prova para os ensaios com o dispositivo QSD tem o formato de arruelas, com um diâmetro externo de 125 mm, interno de 30 mm e espessura de 5 mm. No diâmetro interno foi provido um rasgo de chave, para impedir a rotação da arruela sobre o mandril de suporte. O mandril de suporte é um eixo com diâmetro de 30 mm e um rebaixo com 10 mm para a montagem das arruelas. No rebaixo foi providenciada uma chave e uma rosca para o aperto da arruela por intermédio de um parafuso, Figura 3.10. Para cada ensaio foi empregada uma arruela.

Figura 3.10 – Montagem experimental do QSD.



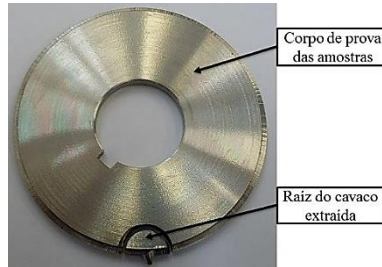
FONTE: Do autor.

O emprego deste dispositivo e corpo de prova facilitou a extração da raiz do cavaco por remoção por descargas elétricas para uma posterior análise. Foi tomado cuidado para não afetar termicamente e mecanicamente as amostras das raízes dos cavacos durante sua extração pelo processo de eletroerosão, sendo feito o corte com uma distância mínima de 3 mm da zona de formação do cavaco em uma condição suave.

### 3.6.2 Análise das raízes do cavaco

Após separadas as raízes dos cavacos dos corpos de prova, conforme Figura 3.11, as amostras foram limpas em banho de ultrassom em álcool etílico e coladas sobre calços com uma fita adesiva de carbono para posterior análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TM3030 - *Hitachi Analytical TableTop Microscope* do CERMAT (Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos).

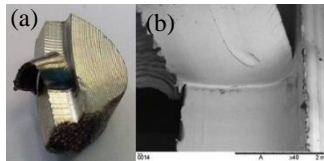
Figura 3.11 – Separação das amostras de raiz de cavaco dos corpos de prova para as análises.



FONTE: Do autor.

A Figura 3.12 ilustra a amostra preparada para análise no MEV (a) e a imagem resultante (b).

Figura 3.12 – Procedimento de análise da raiz do cavaco.



FONTE: Do autor.

### 3.6.3 Microestrutura da raiz do cavaco

Os seguintes procedimentos foram adotados para a preparação das amostras. Primeiramente as amostras individuais foram embutidas a frio em resina de poliéster. O posicionamento das raízes de cavaco para a análise metalográfica foi escolhido de tal forma que tornasse possível a avaliação transversal da raiz de cavaco. Depois de curadas por 24 horas, as amostras foram lixadas manualmente com lixas de granulometria sequencialmente menores, mudando-se a direção em 90° em cada lixa subsequente, até os traços da lixa anterior desaparecerem. As amostras foram lixadas em uma lixadeira Arotec, utilizando lixas de 120, 220, 360, 600 e 1200. Para padronizar as amostras, tomou-se o cuidado de garantir que as análises das amostras fossem feitas exatamente na metade da largura dos cavacos.

Após o lixamento e antes de realizar o polimento das amostras, fez-se uma limpeza em banho de ultrassom em álcool etílico, de modo a garantir que estas estivessem isenta de traços abrasivos, poeiras, contaminação e outros. Após a limpeza fez-se um polimento em duas etapas: com pasta de diamante de 3 µm e de 1 µm. Após o polimento, as amostras das raízes de cavaco foram submetidas ao ataque químico de modo a revelar sua microestrutura. Para cada material do ensaio, utilizaram-se os reagentes e o tempo de ataque descrito na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Reagentes e tempo de ataque da metalografia.

Material	Reagente	Tempo de ataque
UNS S30400	Glicerina + Água Régia	4 minutos (esfregar)
UNS S41426		

FONTE: Do autor.

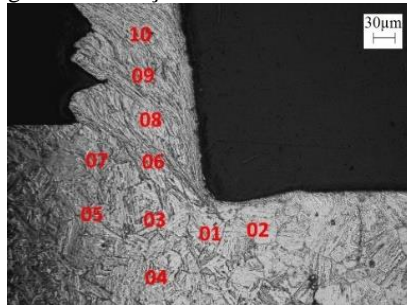
Após o ataque químico obteve-se imagens da microestrutura da raiz do cavaco. O ataque químico e a captura das imagens da microestrutura das raízes de cavaco foram realizados no LCM (Laboratório de Caracterização Microestrutural) com o microscópio Óptico Leica DM4000M.

### 3.6.4 Microdureza

Após a análise da microestrutura da raiz do cavaco foi medida a microdureza na região da zona de fluxo e em torno do plano de

cisalhamento primário conforme Figura 3.13. As medições foram realizadas no CERMAT (Núcleo de pesquisa em materias cerâmicos e compósitos) em um microdurômetro SHIMADZU modelo HVM 2000, carga estática de 2,942N, sendo a distância entre cada indentação 2,5 vezes a largura da marcação realizada, com tempo de 10 segundos. Foram feitas 10 indentações em cada amostra, seguindo as recomendações das normas técnicas [56], conforme apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Regiões de medição das microdurezas nas raízes de cavaco.



FONTE: Do autor.

### 3.6.5 Grau de recalque, ângulo de cisalhamento e zona de fluxo

O grau de recalque foi determinado pela relação entre a espessura do cavaco e a espessura de usinagem. Para a determinação do grau de recalque, foram coletados cavacos durante a realização dos ensaios e a espessura destes medidos com o auxílio de um paquímetro digital da marca Mitutoyo com faixa de indicação de 0 a 150 mm e resolução de 0,01 mm. Foram realizadas 10 medições em pontos diferentes do cavaco e destas medições foi feita a média e o desvio padrão e então calculado o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento através das Equações 2.2 e 2.5 (vide item 2.3.4) respectivamente.

A zona de fluxo foi avaliada e medida nas imagens metalográficas das raízes de cavaco. Para medir a zona de fluxo foram adotadas como critério as linhas de deformação dos contornos de grãos. Ou seja, a partir do momento em que fosse possível identificar as linhas de deformação, este ponto foi adotado como final da zona de fluxo. Isto se deve ao fato de que na zona de fluxo ocorrem deformações em níveis tão altos que não é possível observar a presença de segunda fase do material, contornos de grãos ou outros detalhes metalográficos. Foi utilizado o microscópio óptico Leica DM4000M acoplado com software de medição para verificar a espessura da zona de fluxo.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

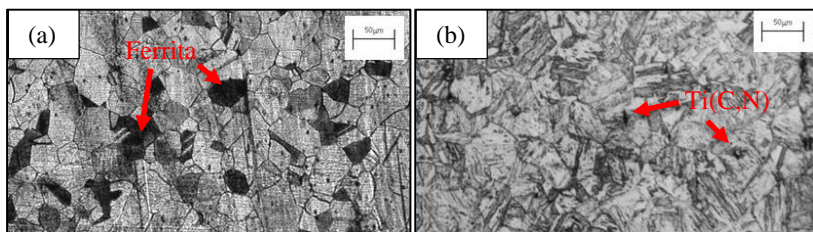
No presente capítulo são apresentados os resultados da pesquisa. Ela está dividida em três etapas, sendo a primeira dos resultados de caracterização do material (item 4.1), a segunda etapa acerca dos resultados obtidos nos ensaios com dispositivo QSD (item 4.2), e a terceira etapa com os resultados nos ensaios de torneamento (item 4.3).

### 4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A caracterização da microestrutura dos aços inoxidáveis empregados nesta pesquisa é apresentada na Figura 4.1.

A Figura 4.1 (a) mostra a microestrutura típica do aço inoxidável austenítico, evidenciando contornos de grãos bem definidos na estrutura austenítica e a presença de ferrita (regiões mais escuras).

Figura 4.1 – Microestrutura dos materiais em estudo.



FONTE: Do autor.

A Figura 4.1 (b) mostra a estrutura típica do aço inoxidável supermartensítico, o qual apresenta em sua estrutura martensita de baixo carbono super revenida e contornos de grãos correspondentes à fase austenítica confirmando as avaliações previamente feitas por Aquino [9] e Corrêa [12]. A microestrutura deste material também apresenta uma pequena quantidade de ferrita delta na forma de estrias. Segundo Paredes [14], a presença desta fase na microestrutura é indesejável, pois leva a uma tensão de escoamento inferior no material. Foram encontrados carbonitretos de titânio  $Ti(C,N)$  na microestrutura que, segundo Carrouge [16], se formam devido à elevada afinidade metalúrgica do titânio com o carbono e o nitrogênio.

O aço inoxidável austenítico UNS S30400 apresentou uma dureza média de 24,3 HRC com um desvio padrão ( $\sigma$ ) de 0,6, e o aço inoxidável

supermartensítico UNS S41426 apresentou uma dureza média de 26,5 HRC com um desvio padrão ( $\sigma$ ) de 0,4. O valor médio da dureza encontrado está de acordo com os valores de dureza apresentados na literatura [4, 59, 60].

## 4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE QSD

No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios com o dispositivo QSD. Eles estão divididos em quatro etapas, sendo a primeira os resultados de análise da raiz do cavaco na interface cavaco-ferramenta e os resultados da microestrutura da seção longitudinal da raiz do cavaco (item 4.2.1), a segunda etapa os resultados de microdureza da raiz do cavaco (item 4.2.2) e a terceira etapa as dimensões da zona de fluxo (item 4.2.3).

### 4.2.1 Análise da raiz do cavaco na interface cavaco-ferramenta

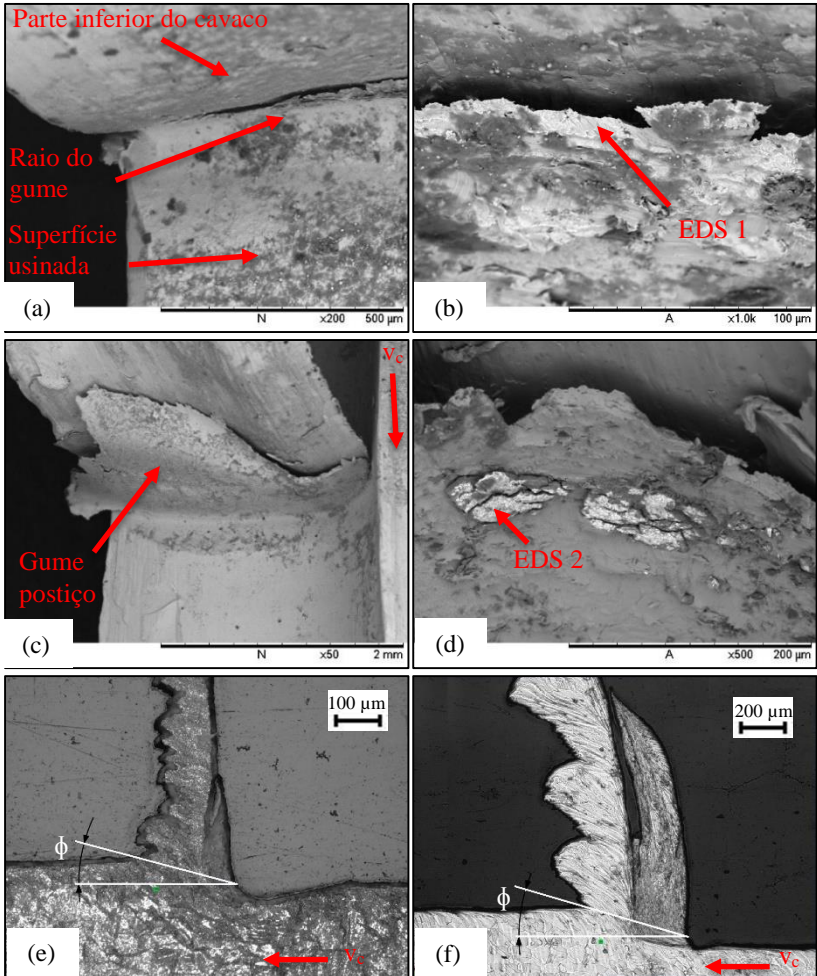
Utilizando a metodologia do item 3.6.2 e 3.6.3, as raízes dos cavacos de cada condição de corte estudada foram analisadas. Todas as amostras apresentam marcas de abrasão na parte inferior do cavaco onde ocorre contato com a superfície de saída da ferramenta, sugerindo o desgaste abrasivo. O mecanismo de desgaste por abrasão, de acordo com Trent e Wright [3], Klocke [21] e Machado *et al.* [4], ocorre quando o material é removido ou deslocado da sua superfície por partículas duras, que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, ou que pertence a uma delas.

As Figuras 4.2 a 4.8 mostram as análises realizadas com o UNS S30400. A raiz do cavaco para os ensaios com velocidade de corte de 20 m/min e avanço de 0,1 mm, é mostrada na Figura 4.2(a) e 4.2(b), sendo que a Figura 4.2(e) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco. As micrografias evidenciam a formação do gume postiço em todos os ensaios quando este material foi usinado com velocidade de 20 m/min.

É possível observar que se formou gume postiço na raiz do cavaco sobre o raio do gume durante a usinagem, tendo sido confirmado pela análise química local qualitativa do EDS 1 (Figura 4.3) de que se trata do material da peça devido aos elementos químicos encontrados. A formação do gume postiço confirma a afirmação de Machado [4] de que na usinagem destes materiais em uma faixa de velocidade de corte menor que 40 m/min ocorre a formação de gume postiço.



Figura 4.2 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S30400 obtida com  $v_c = 20$  m/min,  $a_p = 2$  mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,1$  mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,2$  mm; (e) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,1$  mm; (f) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,2$  mm.



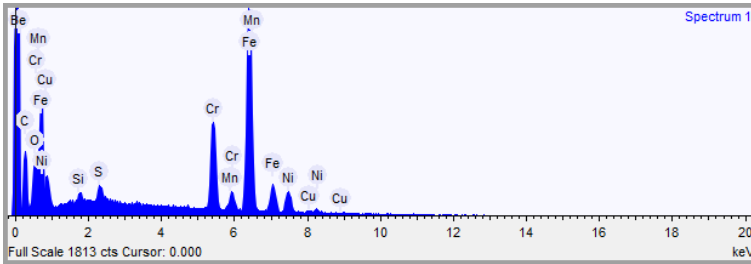
FONTE: Do autor.

A extensão do gume postiço na Figura 4.2(e) é de aproximadamente 200 µm sobre a face da ferramenta e atinge uma altura máxima de aproximadamente 50 µm. Segundo Metals Handbook [61] o

gume postiço é um problema para a vida da ferramenta, pois quando cisalha e fratura, pequenas partículas de material da ferramenta são removidas com o material anteriormente aderido, ou ainda aderir à superfície usinada piorando a qualidade da superfície usinada. As partículas cisalhadas do gume postiço que são removidas pela interface gume/flanco – superfície de corte, aumentam consideravelmente o desgaste de flanco. Além disso, o gume postiço muda o ângulo de saída, trazendo instabilidades no processo de formação do cavaco e causando danos à superfície usinada.

Para verificar a composição de inclusões verificadas na superfície exposta da raiz de cavaco, foram efetuadas análises químicas localizadas qualitativas por EDS. Na região EDS 1 da figura 4.2 (b) mostra a presença de MnS. A inclusão de manganês exerce a tripla função de evitar a formação de sulfeto de ferro e facilitar a fratura do cavaco e lubrificar a região de contato cavaco-ferramenta, além de melhorar a qualidade da superfície usinada [1, 50].

Figura 4.3 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 1 da Figura 4.2 (b).



FONTE: Do autor.

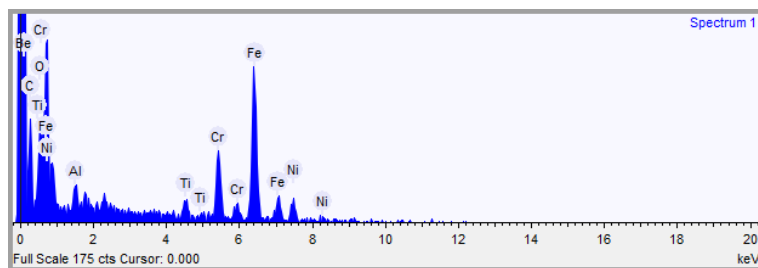
As Figuras 4.2 (c) e 4.2 (d) mostram a raiz do cavaco e a Figura 4.2 (f) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco, para os ensaios com  $v_c = 20$  m/min e  $f = 0,2$  mm.

É evidenciada a formação de gume postiço sobre o raio do gume na raiz do cavaco. Foi realizada uma análise química local EDS 2 (Figura 4.4) nas partículas aderidas no gume postiço, onde foi verificada, além dos elementos químicos do próprio material usinado, há presença de Alumínio (Al) e Titânio (Ti) aderidas no gume postiço, elementos que provavelmente são provenientes do revestimento da ferramenta utilizada nos ensaios. A presença dos elementos do revestimento da ferramenta sugere que houve aderência na zona de cisalhamento secundário.

O gume postiço mostrado na Figura 4.2 (c) apresenta uma dimensão variada ao longo da largura de usinagem. Na lateral esquerda da figura verifica-se que em decorrência das pressões hidrostáticas elevadas na raiz do cavaco, parte do gume postiço é extrudada lateralmente levando a uma largura do cavaco maior que a largura de usinagem. Na região central do gume postiço a sua largura é uniforme, diminuindo na região do raio de quina. A menor magnitude do gume postiço na região do raio de quina é decorrente da menor espessura de usinagem nesta região e consequentemente maior energia específica na formação do cavaco, o que desfavorece a formação do gume postiço.

A micrografia (Figura 4.2 (f)) confirma a formação do gume postiço na condição de corte ensaiada, sendo que a extensão do gume postiço é de aproximadamente 1000  $\mu\text{m}$  sobre a face da ferramenta e atinge uma altura máxima de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ .

Figura 4.4 –Espectro obtido por EDS no ponto EDS 2 da Figura 4.2 (d).



FONTE: Do autor.

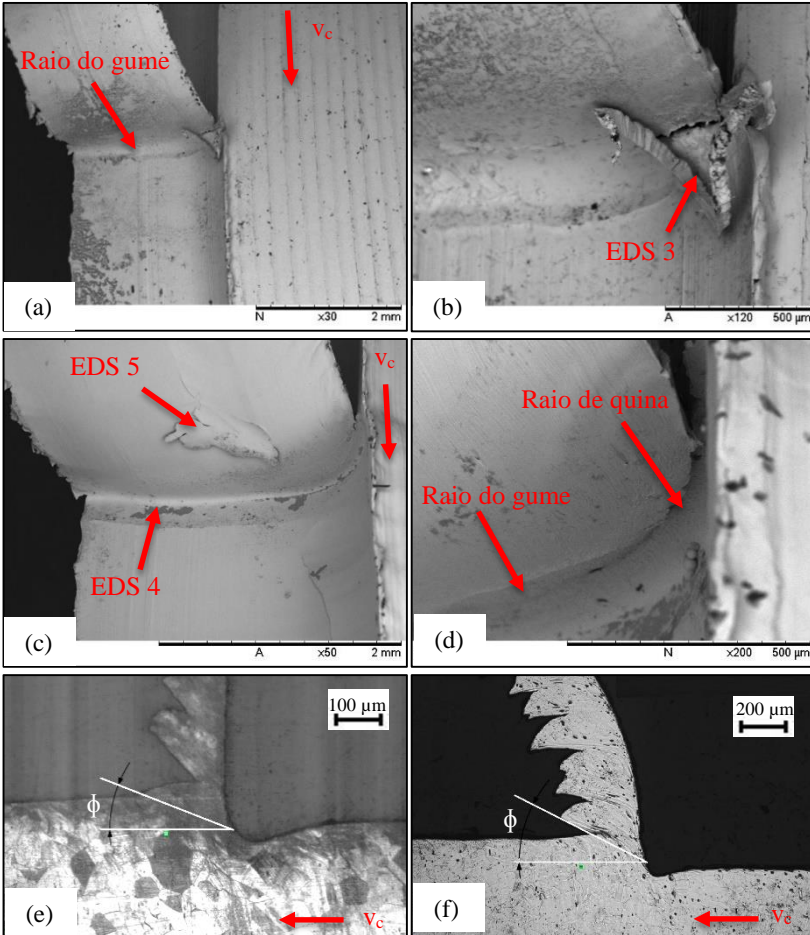
A raiz do cavaco para os ensaios com velocidade de corte de 120 m/min e avanço de 0,1 mm, é mostrado nas Figuras 4.5(a) e 4.5(b), a Figura 4.5(e) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco.

Ocorreu uma deformação na raiz do cavaco na posição da quina da ferramenta proveniente da dinâmica do ensaio com o QSD. Foi realizada uma análise química local EDS 3, verificando-se que os elementos foram similares ao EDS 1. Evidenciou-se após a análise que não há substrato da ferramenta de corte exposto, como também não foi encontrada a presença de elementos químicos dos revestimentos dos inserts.

Conforme a Figura 4.5 (e), a partir dos ensaios com velocidade de corte de 120 m/min não é mais possível observar a presença do gume postiço na interface cavaco-ferramenta.

As Figuras 4.5(c) e 4.5 (d) mostram a raiz do cavaco e a Figura 4.7(f) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco, para os ensaios com  $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,2$  mm.

Figura 4.5 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S30400 obtida com  $v_c = 120$  m/min,  $a_p = 2$  mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,1$  mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,2$  mm; (e) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,1$  mm; (f) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,2$  mm.

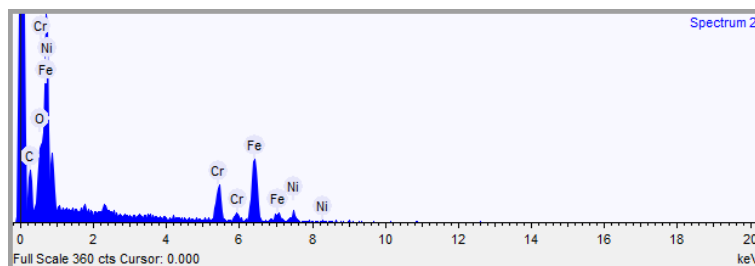


FONTE: Do autor.

De acordo com a análise química local EDS 4 (Figura 4.6) realizada na raiz do cavaco na posição do raio de gume, em virtude da alta presença de cromo (elemento presente no revestimento da ferramenta) conclui-se que provavelmente houve aderência do revestimento na peça. Segundo Lucas [5] essa aderência do revestimento é explicada pela forma de interrupção de corte nos ensaios com QSD, visto que neste procedimento enfrenta-se uma condição de corte transitória, na qual a espessura do cavaco varia do valor máximo (correspondente ao avanço), para um valor mínimo (correspondente à espessura mínima de usinagem). Assim, à medida que a espessura de usinagem diminui o ângulo de saída efetivo diminui também, até se tornar negativo, quando então o material para de escoar e ocorre aderência do material da peça no gume.

A análise química local EDS 5 mostrou resultados semelhantes ao EDS 1, e verificou-se apenas a presença de elementos químicos do próprio material usinado, sugerindo que foi uma deformação proveniente da superfície de saída da ferramenta.

Figura 4.6 –Espectro obtido por EDS no ponto EDS 4 da Figura 4.5 (c).

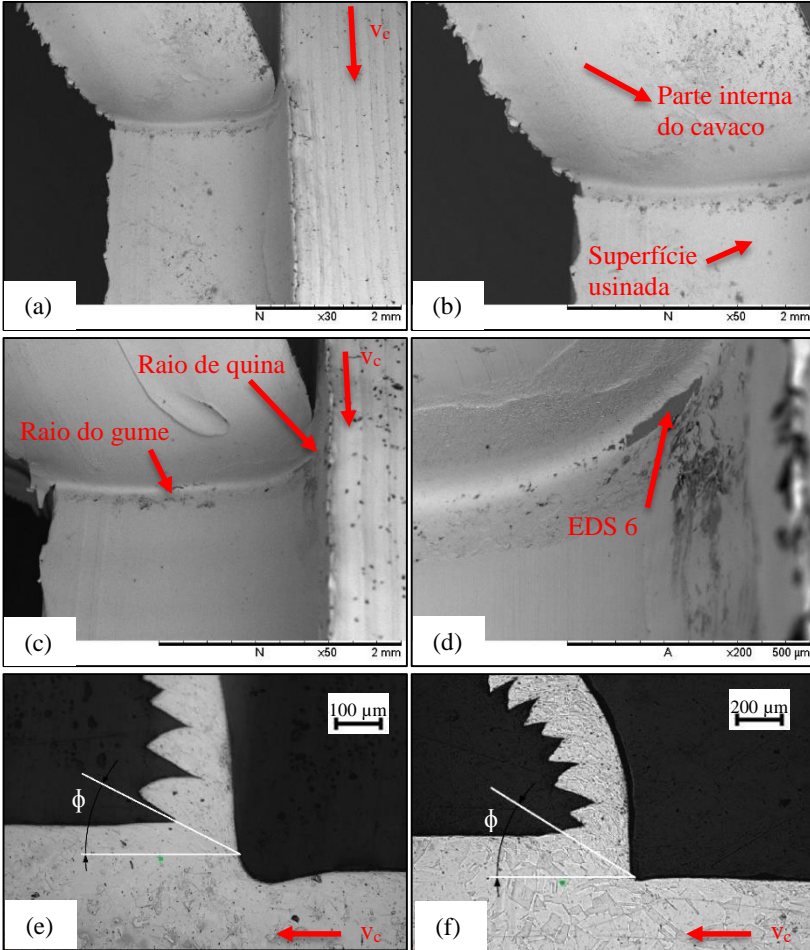


FONTE: Do autor.

A raiz do cavaco para os ensaios com velocidade de corte de 220 m/min e avanço de 0,1 mm é mostrada nas Figuras 4.7(a) e 4.7(b). Já a Figura 4.7(e) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco.

As Figuras 4.7(c) e 4.7 (d) mostram a raiz do cavaco e a Figura 4.7 (f) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco, para os ensaios com  $v_c = 220$  m/min e  $f = 0,2$  mm.

Figura 4.7 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S30400 obtida com  $v_c = 220$  m/min,  $a_p = 2$  mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,1$  mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,2$  mm; (e) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,1$  mm; (f) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,2$  mm.

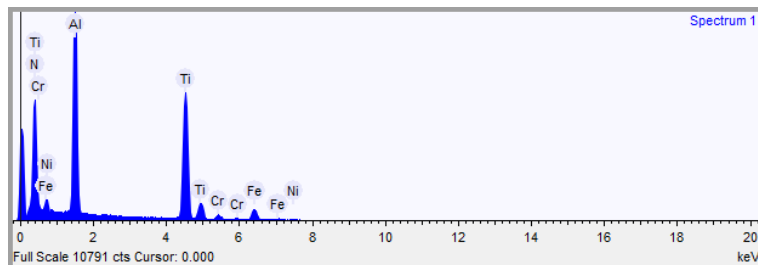


FONTE: Do autor.

Foi realizada uma análise química local EDS 6 (Figura 4.8) nas partículas aderidas na raiz do cavaco na posição da quina da ferramenta, verificando a presença, além dos elementos químicos do próprio material

usinado, de Alumínio (Al), Titânio (Ti) e Nitrogênio (N), provenientes do revestimento da ferramenta.

Figura 4.8 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 6 da Figura 4.7 (d).



FONTE: Do autor.

As Figuras 4.9 a 4.13 mostram as imagens das raízes do cavaco obtidas por ensaio com dispositivo QSD nos ensaios com o UNS S41426.

A raiz do cavaco para os ensaios com velocidade de corte de 20 m/min e avanço de 0,1 mm, é mostrada nas Figuras 4.9(a) e 4.9(b). As Figuras 4.9(c) e 4.9(d) mostram a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco.

É evidenciada a formação de gume postiço na raiz do cavaco. Foi realizada uma análise química local EDS 7 nas partículas aderidas no gume postiço, com resultados semelhantes ao EDS 2, através dos quais percebe-se que não há substrato da ferramenta de corte exposto, bem como ocorre a presença de Cromo (Cr) e Titânio (Ti), provenientes do revestimento da ferramenta. Tal fato evidencia a formação de uma camada aderida sobre o gume.

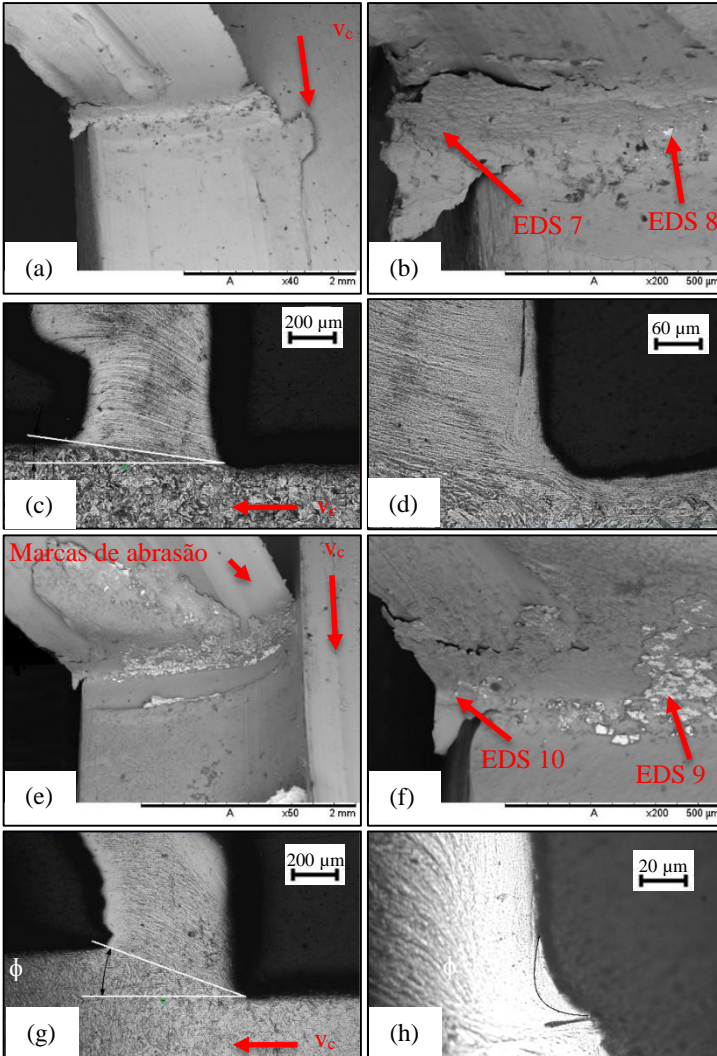
A extensão do gume postiço, na Figura 4.12(d), é de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$  sobre a face da ferramenta e atinge uma altura máxima de aproximadamente 35  $\mu\text{m}$ .

As Figuras 4.9 (e) e 4.9 (f) mostram a raiz do cavaco e as Figuras 4.14 (g) e 4.9 (h) mostram a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco, para os ensaios com  $v_c = 20$  m/min e  $f = 0,2$  mm.

A extensão do gume postiço na Figura 4.9 (h) é de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$  sobre a face da ferramenta e atinge uma altura máxima de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .



Figura 4.9 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S41426 obtida com  $v_c = 20$  m/min,  $a_p = 2$  mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,1$  mm; (c) e (d) micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco com  $f = 0,1$  mm; (e) e (f) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,2$  mm; (g) e (h) micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco com  $f = 0,2$  mm.

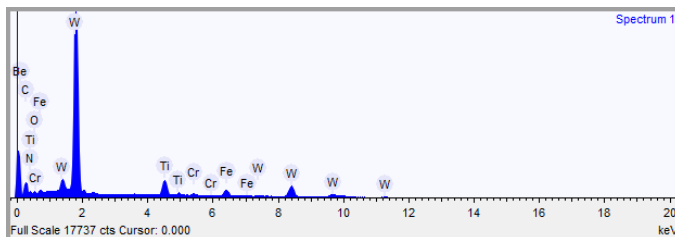


FONTE: Do autor.



Na análise química local EDS 8 (Figura 4.10) é possível notar que existe elevado teor de tungstênio (W), indicando que neste ponto o revestimento da ferramenta foi removido e o substrato do inserto entrou em contato com o material durante a usinagem.

Figura 4.10 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 8 da Figura 4.9 (b).

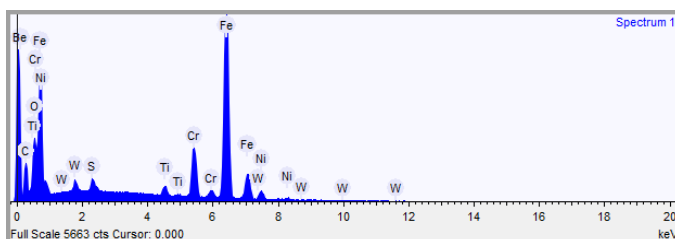


FONTE: Do autor.

Na espectrometria onde foi realizado uma análise química local EDS 9 os resultados foram semelhantes ao EDS 8, sendo que o elevado teor de tungstênio (W) presente no local indica que o revestimento da ferramenta foi removido e o substrato da ferramenta entrou em contato com o material.

Na espectrometria onde foi realizado uma análise química local EDS 10 (Figura 4.11) sobre o gume postiço formado na interface material-peça é possível verificar que além dos elementos do material usinado existe a presença de tungstênio (W), cromo (Cr) e Titânio (Ti), que são elementos da ferramenta de corte. Tal fato sugere que a ferramenta foi lascada durante a usinagem.

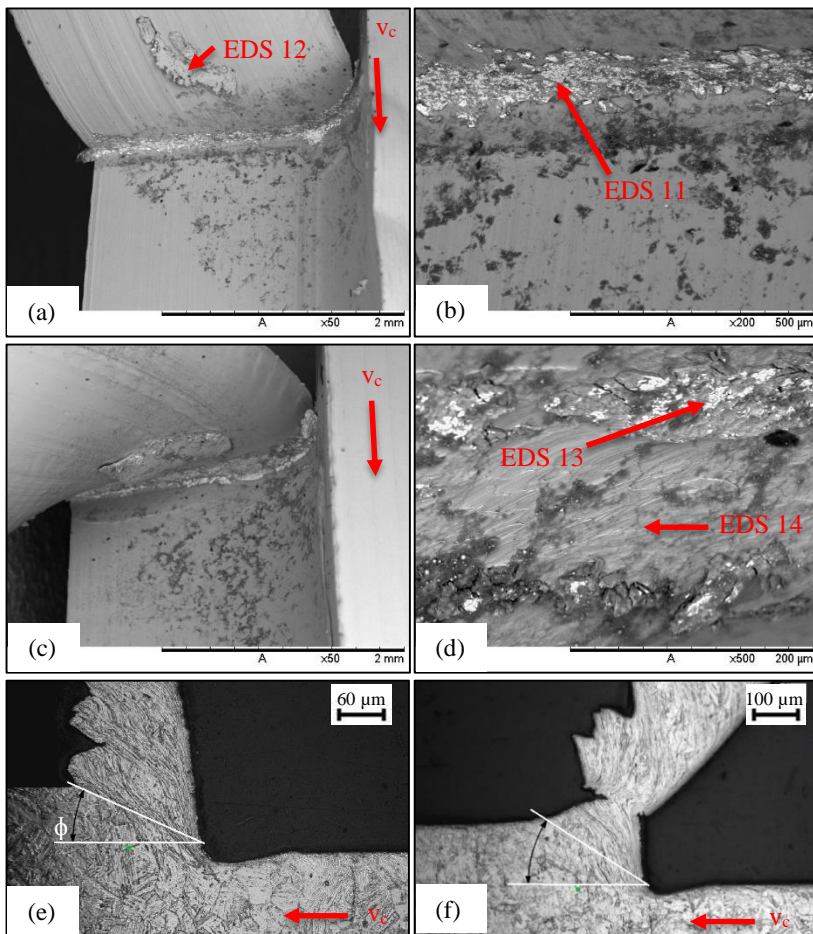
Figura 4.11 – Espectro obtido por EDS no ponto EDS 10 da Figura 4.9 (f).



FONTE: Do autor.

A raiz do cavaco para os ensaios com velocidade de corte de 120 m/min e avanço de 0,1 mm, é mostrado na Figura 4.12(a) e 4.12(b). A Figura 4.12(e) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco.

Figura 4.12 –Imagem da raiz do cavaco do UNS S41426 obtida com  $v_c = 120$  m/min,  $a_p = 2$  mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,1$  mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,2$  mm; (e) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,1$  mm; (f) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,2$  mm.



FONTE: Do autor.

A análise do espectro no EDS 11 e 12 mostrou uma semelhança entre os elementos químicos encontrados com os resultados do EDS 8, onde há presença de tungstênio (W), cromo (Cr) e Titânio (Ti), sendo estes elementos químicos presentes na ferramenta indicando que a ferramenta lascou durante no ensaio e ficou aderida na raiz do cavaco.

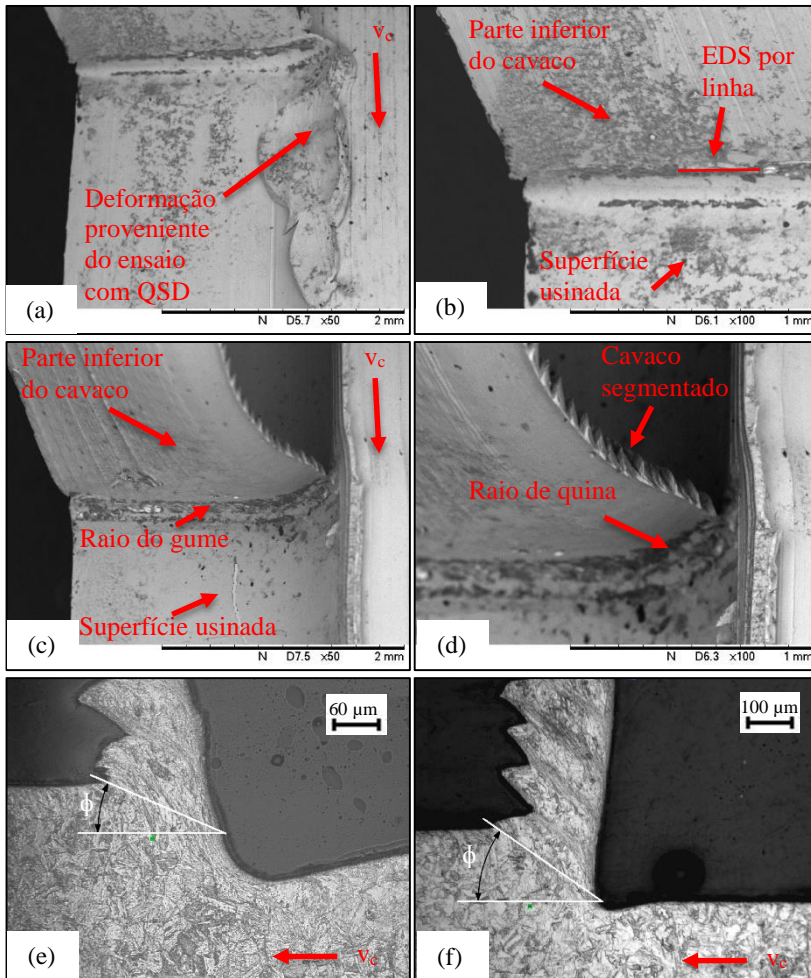
As Figuras 4.12 (c) e 4.12 (d) mostram a raiz do cavaco e a Figura 4.12 (f) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco, para os ensaios com  $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,2$  mm.

A análise do espectro no EDS 13 e 14 mostrou uma semelhança entre os elementos químicos encontrados com os resultados do EDS 2, onde há presença de cromo (Cr) e Titânio (Ti), sendo estes elementos químicos presentes no revestimento da ferramenta indicando que o revestimento ficou aderido na raiz do cavaco.

A raiz do cavaco, para os ensaios com velocidade de corte de 220 m/min e avanço de 0,1 mm, é mostrada na Figura 4.13 (a) e 4.13 (b). A Figura 4.13 (e) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco, verificando-se através do ensaio com QSD uma grande deformação na região da quina da ferramenta. Foi realizada uma análise química por linha que mostrou a presença dos elementos químicos presentes no revestimento da ferramenta - cromo (Cr), alumínio (Al) e Titânio (Ti).

A Figura 4.13(c) e 4.13 (d) mostra a raiz do cavaco e a Figura 4.13(f) mostra a micrografia da seção longitudinal da raiz do cavaco, para os ensaios com  $v_c = 220$  m/min e  $f = 0,2$  mm. Não há sinais da presença de gume postiço, como também não se verificam sinais da presença do revestimento da ferramenta. Segundo Childs *et al.* [62], quando existe pequena adesão entre o cavaco e a ferramenta, observa-se uma separação mais limpa entre estes dois elementos nos testes com dispositivo QSD.

Figura 4.13 – Imagem da raiz do cavaco do UNS S41426 obtida com  $v_c = 220$  m/min,  $a_p = 2$  mm; (a) e (b) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,1$  mm; (c) e (d) MEV da raiz do cavaco com  $f = 0,2$  mm; (e) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,1$  mm; (f) micrografia da seção longitudinal com  $f = 0,2$  mm.



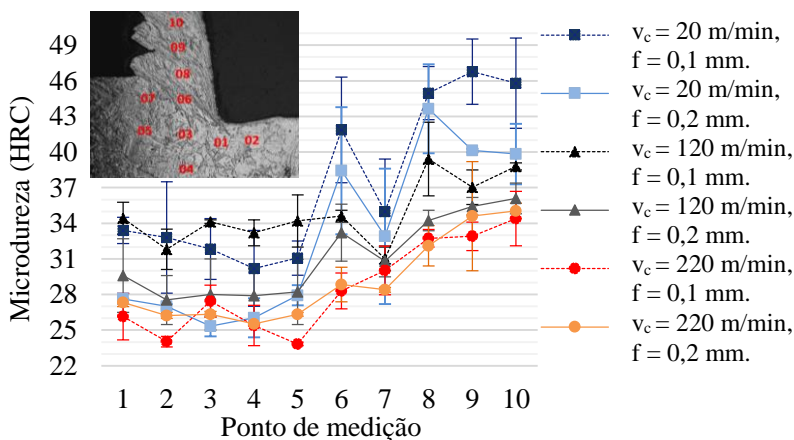
FONTE: Do autor.

## 4.2.2 Microdureza das raízes de cavaco

Utilizando a metodologia descrita no item 3.3.3 (ver Figura 3.14), foram verificadas a microdureza ao longo da zona de fluxo e em torno do plano de cisalhamento primário na subsuperfície das amostras das raízes dos cavacos obtidas nos ensaios com os dois materiais. Os resultados apresentados de forma completa das medições de microdureza do UNS S30400 e do UNS S41426 estão no Apêndice B.

A Figura 4.14 ilustra os resultados obtidos na medição da microdureza com seus respectivos desvios padrões do UNS S30400. Os maiores valores encontrados nas medições estão nos pontos próximos da zona de fluxo, o que se deve à grande deformação plástica existente nesta região durante o corte, acarretando encruamento do material. Quanto maior a velocidade menor foi a microdureza medida, o que de acordo com Klocke [21] pode ser atribuído à maior temperatura durante o corte, o que gera uma menor resistência da liga e conseqüentemente uma menor deformação para promover o corte. Segundo Trent e Wright [3], quando submetidos a elevadas temperaturas todos os materiais sofrem redução na dureza. Segundo Machado *et al.* [4] a força de corte reduz com o aumento da velocidade de corte, uma vez que há maior geração de calor, e, portanto, redução da resistência ao cisalhamento, reduzindo ligeiramente a área de contato cavaco-ferramenta.

Figura 4.14 – Microdureza do UNS S30400 em diferentes condições de corte.



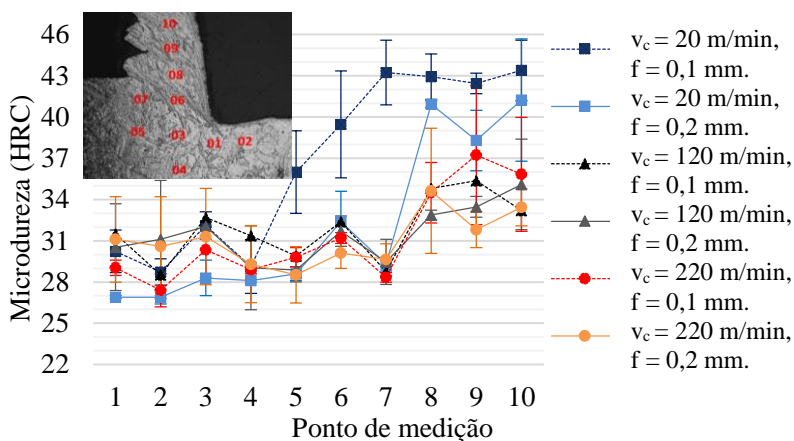
FONTE: Do autor.

De acordo com os resultados obtidos é possível observar que o aumento de dureza ocorre próximo ao plano de cisalhamento e atinge os maiores valores nas regiões próximas a zona de fluxo.

A Figura 4.15 ilustra os resultados obtidos na medição da microdureza com seus respectivos desvios padrões do UNS S41426.

Com base nos resultados obtidos pode-se observar que o UNS S41426 teve o mesmo comportamento que o UNS S30400, porém com menores valores de microdureza. Tal diferença tem relação direta com a diferença da dureza e resistência das ligas. Este comportamento é devido à maior capacidade de encruamento das ligas com maior dureza original, que também apresentam redução da ductilidade, o que exerce grande influência na capacidade de deformação do material e, portanto, na microdureza [60].

Figura 4.15 – Microdureza do UNS S41426 em diferentes condições de corte.



FONTE: Do autor.

Os resultados obtidos nas medições de microdureza mostram que quanto mais distante da superfície da peça, menor a microdureza, o que deve ocorrer devido às altas taxas de deformações na interface cavaco-ferramenta. Este comportamento coincide com a teoria de Darwin [63] e Griffiths [64], bem como com os resultados relatados no trabalho de Da Silva [65]. O efeito da deformação plástica e o aumento das tensões residuais causam o encruamento próximo à superfície usinada, levando a um aumento gradual da dureza na superfície deformada [66]. Callister

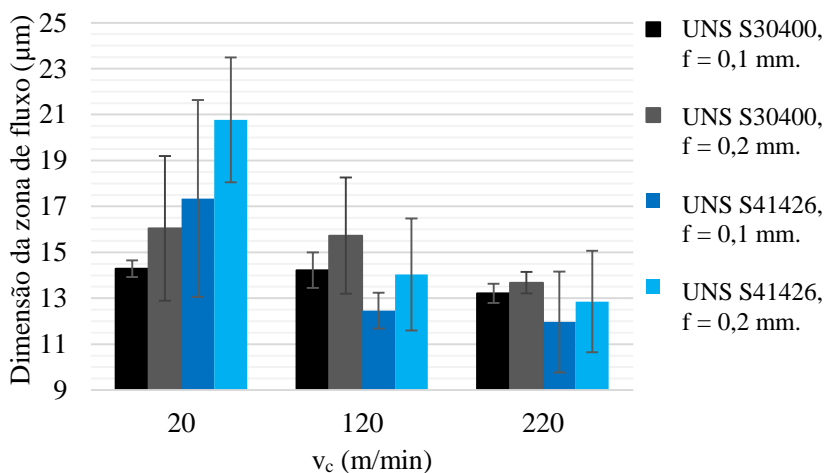
[60] explica que o encruamento é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando submetido a uma deformação plástica.

### 4.2.3 Dimensões da zona de fluxo

As dimensões da zona de fluxo foram caracterizadas pelas suas espessuras ao longo das amostras da raiz do cavaco preparadas metalograficamente.

A Figura 4.16 ilustra os resultados obtidos da espessura da zona de fluxo. Fazendo uma análise é possível perceber que há uma grande zona de fluxo na velocidade de corte mais baixa ensaiada (20 m/min), possivelmente devido à presença do gume posição que modifica as condições da interface cavaco-ferramenta. Com relação à velocidade de corte, à medida que este fator é aumentado, menor é o tempo de contato entre a ferramenta e o material, portanto, menor é o tempo que o cavaco tem para se deformar. Por outro lado, gera-se mais calor, aumentando a temperatura, o que garante maior plasticidade ao material. Essa diminuição da zona de fluxo com o aumento da velocidade de corte está de acordo com os resultados obtidos por Sousa [67], que verificou uma diminuição na zona de fluxo com o aumento da velocidade de corte.

Figura 4.16 – Dimensão da zona de fluxo.



FONTE: Do autor.

O aumento do avanço acarreta um aumento da dimensão da zona de fluxo, resultado que possivelmente ocorre devido ao aumento da força de usinagem e temperatura, que por sua vez acarreta uma maior deformação do cavaco. Esta influência do avanço sobre a zona de fluxo também foi verificada por Ribeiro *et al.* [39] e Sousa [67].

É possível observar também que o UNS S41426 é mais sensível à variação de velocidade de corte que o UNS S30400 (mais dúctil) devido à diferença da tensão de escoamento dos materiais. Quando o material é mais dúctil, suporta um grau de deformação maior, mas também tem reduzida sua resistência [3, 60].

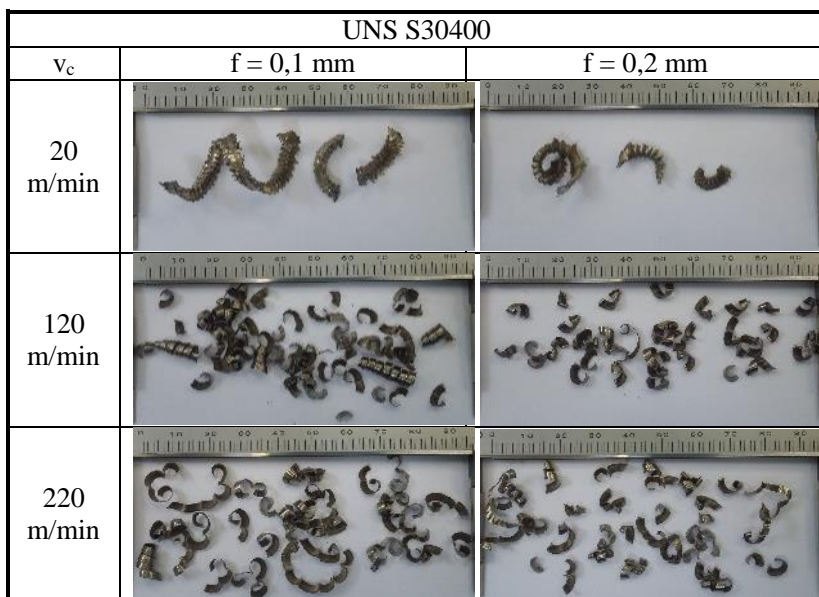
### 4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS CAVACOS

As imagens das amostras dos cavacos para o UNS S30400 e para o UNS S41426 estão representadas na Figura 4.17 e Figura 4.18 respectivamente, usinadas com as seguintes condições de corte: avanços de 0,1 mm e 0,2 mm, sendo a profundidade de corte mantida em 2 mm e velocidade de corte variada em 20 m/min, 120 m/min e 220 m/min para ambos os materiais. Na sequência foi feita uma análise visual da forma dos cavacos, visto que quanto ao tipo (ou classe) todos se apresentaram como cavacos em forma de lamelas [21].

Para o UNS S30400 (Figura 4.17) usinado a uma velocidade de 20m/min o avanço não alterou a forma do cavaco, que se apresentou como cavaco helicoidal tipo arruela longo. Para as velocidades de corte de 120 e 220 m/min e avanço de 0,1 mm os cavacos se apresentaram na forma de arco conectado, e para a velocidade de corte de 120 e 220 m/min e avanço de 0,2 mm os cavacos se apresentaram na forma de cavaco em arco solto. Essa fragmentação do cavaco com o aumento do avanço está de acordo com os resultados apresentados na literatura [1, 4, 21, 45]. Geralmente, maiores velocidades de corte, menores avanços e menores profundidades de corte favorecem a formação dos cavacos longos [4]. Tais resultados também são corroborados por Noordin *et al.* [34], que realizaram o torneamento a seco de um aço inoxidável martensítico variando o avanço e a velocidade de corte e concluíram que a taxa de avanço influencia fortemente a forma do cavaco.



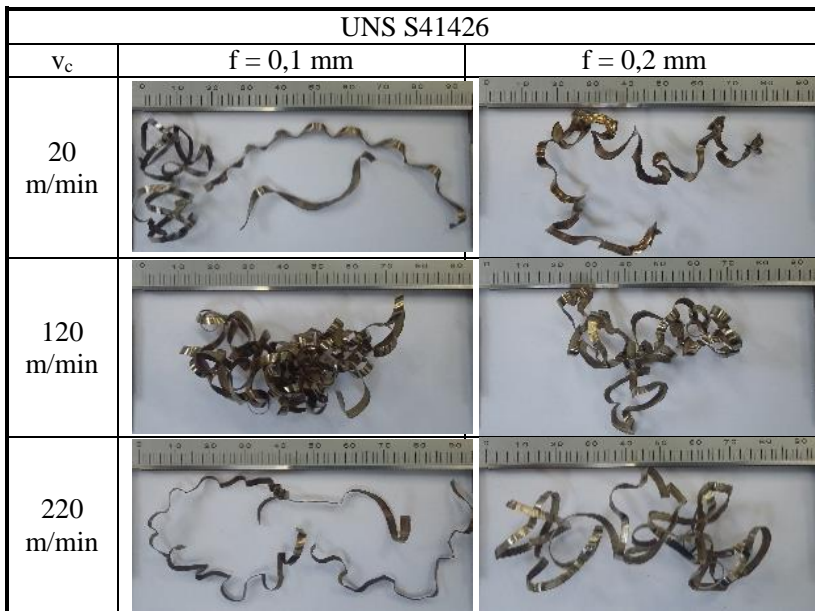
Figura 4.17 – Cavacos coletados após a usinagem do UNS S30400.



FONTE: Do autor.

Para o UNS S41426 (Figura 4.18) os cavacos apresentaram a forma de cavaco em fita emaranhado para avanços de 0,1 mm para todas as velocidades de corte e para avanços de 0,2 mm os cavacos tiveram a forma de cavaco em fita emaranhado com uma leve tendência a cavaco em arco conectado, o que mostra a tendência de produção de cavacos mais curtos com o aumento do avanço. Estes resultados estão de acordo com Shaw Shaw [27], que atesta que as propriedades do material, principalmente a dureza, favorecem a formação dos cavacos segmentados. Materiais com menores durezas, como é o caso do UNS S30400, tendem a formar cavacos com “dentes de serra” mais salientes que materiais com maiores durezas, como o UNS S41426.

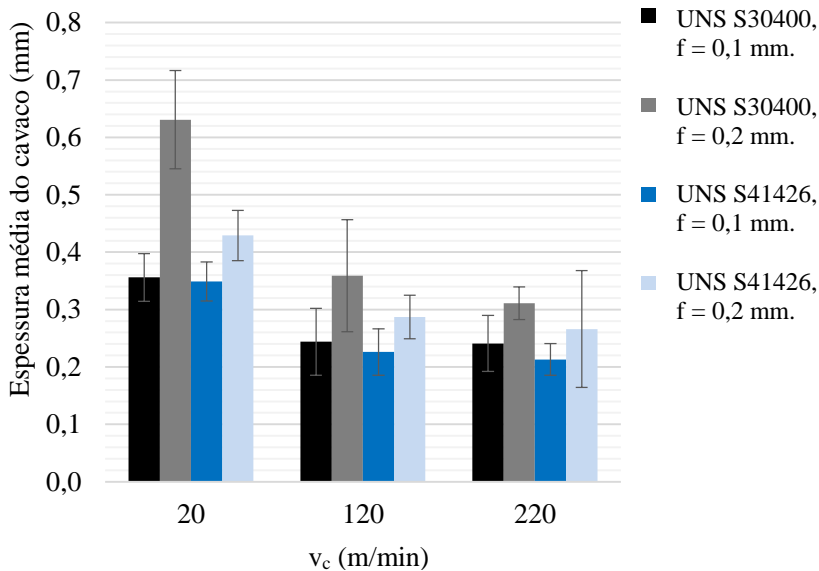
Figura 4.18 – Cavacos coletados após a usinagem do UNS S41426.



FONTE: Do autor.

A Figura 4.19 mostra o valor médio representativo da espessura do cavaco com seus respectivos desvios padrão após 10 medições em cada condição de usinagem. De acordo com os resultados o UNS S30400 se deforma mais durante a usinagem que o UNS S41426. Barbosa [36] também verificou que nas mesmas condições de usinagem o aço inoxidável austenítico é o que mais se deforma, seguido pelo duplex e finalmente pelo martensítico. Essa maior deformação é devido à sua estrutura cristalina do austenítico (CFC), que apresenta mais planos preferenciais de deslizamento, resistindo menos à deformação do que a estrutura cristalina mista do Duplex (CCC+CFC) e a estrutura cristalina do martensítico (TCC) [68].

Figura 4.19 – Espessura do cavaco em função da velocidade de corte.



FONTE: Do autor.

Após a medição da espessura do cavaco foram realizados Testes de Hipóteses [69], com nível de confiança de 95%, com o objetivo de verificar a influência das condições de usinagem sobre a espessura do cavaco. As análises estatísticas foram divididas em três casos.

No primeiro caso mantêm-se constante o avanço e a profundidade de corte e compara-se a espessura média do cavaco em função da velocidade de corte. Os resultados do Teste de Hipóteses estão dispostos na Tabela 4.1 (UNS S30400) e Tabela 4.2 (UNS S41426), sendo que para a realização dessa análise estatística foi estabelecido como hipótese nula que a espessura do cavaco permanece igual em todas as velocidades de corte ( $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ), e como hipótese alternativa, tem-se que o aumento da velocidade de corte diminui a espessura do cavaco ( $H_1: \mu_1 > \mu_2$ ).

Tabela 4.1 – Teste de Hipótese do UNS S30400 para a variação de  $v_c$ .

f	$v_{c1}$	$v_{c2}$	T	$t_\alpha$ ( $\alpha = 0,05$ )	Rejeita-se $H_0$ se $T < t_\alpha$	Rejeita-se $H_1$ se $T > t_\alpha$
0,1	20	120	2,26	4,93	Hipótese rejeitada	Hipótese aceita
0,1	120	220	2,26	0,12	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada
0,2	20	120	2,26	6,62	Hipótese rejeitada	Hipótese aceita
0,2	120	220	2,26	1,49	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada

FONTE: Do autor.

A partir do Teste de Hipóteses, conforme Tabela 4.2 e Tabela 4.3, pode-se concluir com nível de confiança de 95%, tanto em relação ao UNS S30400 como para o UNS S41426, que aumentando-se a velocidade de corte de 20 m/min para 120 m/min nas duas condições de avanço (0,1 e 0,2 mm) ocorre um aumento na espessura do cavaco. Entretanto, em relação ao aumento de velocidade de corte de 120 para 220 m/min não se pode afirmar com um nível de confiança de 95% que a espessura do cavaco aumentará.

Tabela 4.2 – Teste de Hipótese do UNS S41426 para a variação de  $v_c$ .

f	$v_{c1}$	$v_{c2}$	T	$t_\alpha$ ( $\alpha = 0,05$ )	Rejeita-se $H_0$ se $T < t_\alpha$	Rejeita-se $H_1$ se $T > t_\alpha$
0,1	20	120	2,26	7,36	Hipótese rejeitada	Hipótese aceita
0,1	120	220	2,26	0,84	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada
0,2	20	120	2,26	7,76	Hipótese rejeitada	Hipótese aceita
0,2	120	220	2,26	0,61	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada

FONTE: Do autor.

No segundo caso mantêm-se constante a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço e compara-se a espessura do cavaco em

função do material. Os resultados do Teste de Hipóteses estão dispostos na Tabela 4.3, sendo que para a realização dessa análise estatística foi estabelecido como hipótese nula que nas mesmas condições de usinagem a espessura do cavaco permanece igual para os diferentes materiais ( $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ). Como hipótese alternativa tem-se que nas mesmas condições de usinagem o UNS S30400 tem a espessura do cavaco maior que o UNS S41426 ( $H_1: \mu_1 > \mu_2$ ).

Tabela 4.3 – Teste de Hipótese da diferença da espessura do cavaco em função do material.

$v_c$	f	Mat. 1	Mat. 2	T	$t_\alpha$ ( $\alpha = 0,05$ )	Rejeita-se $H_0$ se $T < t_\alpha$	Rejeita-se $H_1$ se $T > t_\alpha$
20	0,1	A	B	2,57	0,41	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada
20	0,2	A	B	2,57	6,64	Hipótese rejeitada	Hipótese aceita
120	0,1	A	B	2,57	0,8	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada
120	0,2	A	B	2,57	2,17	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada
220	0,1	A	B	2,57	1,58	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada
220	0,2	A	B	2,57	1,35	Não se pode rejeitar $H_0$	Hipótese rejeitada

FONTE: Do autor.

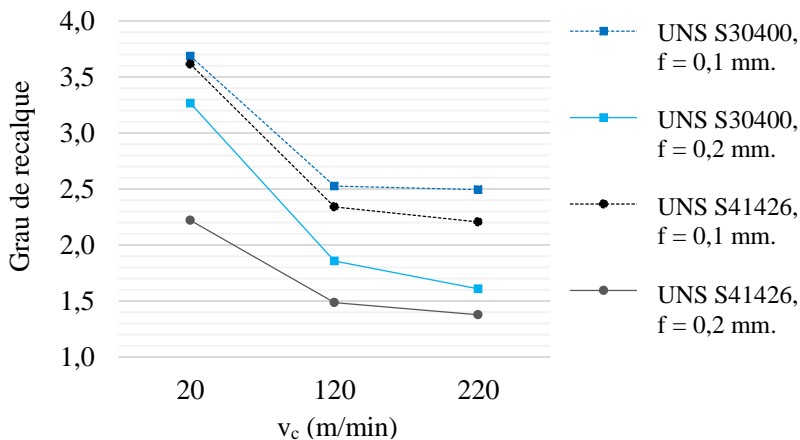
A partir do Teste de Hipóteses, pode-se concluir com nível de confiança de 95% que para velocidades de corte de 20 m/min e avanços de 0,2 mm o UNS S30400 apresenta uma espessura do cavaco maior que o UNS S41426. Nas demais condições de usinagem, com um nível de confiança de 95%, não se pode afirmar que o UNS S30400 apresente uma espessura do cavaco maior que o UNS S41426 nas mesmas condições de usinagem.

#### 4.3.1 Grau de recalque e ângulo de cisalhamento

A partir dos dados da espessura do cavaco, o grau de recalque foi calculado utilizando a Equação 2.1.

A Figura 4.20 apresenta a variação do grau de recalque em função da  $v_c$ , avanço e material. Os materiais apresentam uma tendência em reduzir a deformação com o aumento do avanço e da velocidade de corte, porém o UNS S30400 se deforma mais durante a usinagem que o UNS S41426.

Figura 4.20 – Grau de recalque em função da velocidade de corte, avanço e material usinado.



FONTE: Do autor.

O grau de recalque diminuiu com o aumento da velocidade de corte, sendo que o grau de recalque mais elevado foi na velocidade de corte de 20 m/min, o que possivelmente se deve à presença de gume posição. O aumento da velocidade de corte reduz-se a deformação devido à maior velocidade com que o material passa pela zona de cisalhamento primário. Neste caso, a baixa difusividade térmica dos aços inoxidáveis faz com que a resposta às mudanças nas condições térmicas impostas pelo corte ocorra mais lentamente, exigindo um maior tempo (velocidade de corte menor) para que o calor gerado conduza ao amolecimento do material e promova uma maior deformação [4, 36, 70]. Para Machado *et al.* [4] o fato da formação de cavaco se dar com tanta rapidez que não possibilite a transmissão e distribuição do calor gerado é denominado de “corte adiabático”.

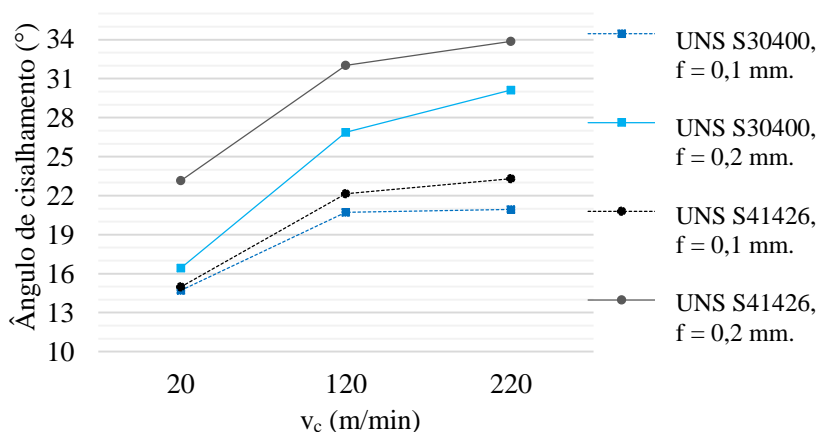
Avanços de 0,1 mm acarretaram um grau de recalque do cavaco maior que quando empregados avanços de 0,2mm, para ambos os

materiais. Segundo Barbosa [36] isto pode estar relacionado ao aumento da área dos planos de cisalhamento, contribuindo para a redução na temperatura concentrada na zona de cisalhamento, acarretando assim uma menor deformação do material.

É sabido que pequenos ângulos de cisalhamento e altos graus de recalque, significam grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário, no qual o material entra no regime plástico e o avanço da ferramenta promove a ruptura do material que sai como cavaco [4]. Quanto maior o grau de recalque, menor será o ângulo de cisalhamento e maiores serão os esforços de corte necessários para cisalhar o material [21].

A Figura 4.21 mostra a variação do ângulo de cisalhamento em função da velocidade de corte, do avanço e do material usinado.

Figura 4.21 – Variação do ângulo de cisalhamento em função da velocidade de corte, do avanço e do material usinado.



FONTE: Do autor.





## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas através da análise dos resultados, como também sugestões para futuros trabalhos.

### 5.1. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizados ensaios desenvolvidos com os materiais A (aço inoxidável austenítico AISI 304) e B (aço inoxidável supermartensítico S41426) utilizando um dispositivo de parada súbita (QSD), com o objetivo de investigar o processo de formação do cavaco durante o torneamento, e com base nisso realizar considerações sobre o comportamento dos aços inoxidáveis durante a formação do cavaco.

Verificou-se durante os ensaios a formação de gume posição ao usinar ambos os materiais (UNS S30400 e UNS S41426) com uma velocidade de corte de 20 m/min.

Os materiais ensaiados apresentam uma tendência em sofrer uma redução no grau de deformação com o aumento do avanço e da velocidade de corte, porém o UNS S30400 se deforma mais durante a usinagem que o UNS S41426 devido à sua estrutura cristalina. O grau de recalque diminuiu com o aumento da velocidade de corte, sendo que o valor mais elevado ocorreu quando se usinou a uma velocidade de corte de 20 m/min, o que possivelmente se deve à presença de gume posição. O aumento do avanço diminuiu o grau de recalque devido ao aumento da área dos planos de cisalhamento, o que contribui para a redução na temperatura concentrada na zona de cisalhamento.

Com relação à zona de fluxo verificou-se que com o aumento da velocidade de corte ocorre uma diminuição da zona de fluxo, devido ao menor tempo de contato na interface cavaco-ferramenta. Verifica-se uma grande zona de fluxo na velocidade de corte mais baixa ensaiada (20 m/min), possivelmente devido à presença do gume posição que modifica as condições da interface cavaco-ferramenta. O aumento do avanço acarreta um aumento da dimensão da zona de fluxo, resultado que possivelmente ocorre devido ao aumento da força de usinagem e temperatura. Pode-se observar também que o UNS S41426 é mais sensível à variação de velocidade de corte que o UNS S30400 (mais dúctil) devido à diferença da tensão de escoamento dos materiais.

Com os ensaios de microdureza verifica-se que o UNS S41426 teve o mesmo comportamento que o UNS S30400, porém apresentando menores valores de microdureza. Tal diferença tem relação direta com a

dureza e resistência das ligas. O aumento da velocidade de corte resultou na diminuição da microdureza na raiz do cavaco. Ocorreu um aumento na microdureza próximo à zona de cisalhamento e foram atingidos os maiores valores nas regiões próximas à zona de fluxo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Investigar a influência da lubrificação nas propriedades da zona de fluxo;
- Investigar a influência do revestimento da ferramenta nas propriedades da zona de fluxo;
- Investigar a influência da geometria da ferramenta nas propriedades da raiz do cavaco e zona de fluxo;
- Aplicar a metodologia deste trabalho em outros materiais relevantes para a indústria.
- Realizar a filmagem do dispositivo QSD em usinagem com uma câmera de alta velocidade.
- Realizar ensaios com o emprego de velocidades de corte maiores.
- Realizar os ensaios com diferentes ângulos de saída da ferramenta.

## REFERÊNCIAS

1. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3 ed. São Paulo: Artliber, 2001.
2. WALKER, J. M. **Handbook of Manufacturing Engineering**. New York: Marcel Dekker, 1996.
3. TRENT, E. M., WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000, 464 p.
4. MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.
5. LUCAS, E. **Desenvolvimento de um dispositivo Quick-Stop e sua aplicação no estudo da formação do cavaco na usinagem do ferro fundido nodular ferrítico**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2003.
6. APERAM. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. Gerência Executiva de Desenvolvimento de Mercado e Assistência Técnica Inox. 2008.
7. SILVA, A.; MEI, P. **Aços e ligas especiais**. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.
8. ATLAS STEELS. **The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels**. Atlas Steels Technical Department. 2013.
9. AQUINO, J. M. **Avaliação do comportamento eletroquímico de juntas soldadas de aço inoxidável supermartensítico por feixe de elétrons baixo vácuo**. 2007. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
10. FARRAR, J. C. M. **The alloy tree: A guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys**. 1° ed. Cambridge: Editora Woodhead, 2004. 206p.

11. KONDO, K. *et al.* **Alloy design of super 13Cr martensitic stainless steel (Development of super 13Cr martensitic stainless steel for line pipe-1)**. Supermartensitic Stainless Steel 99, 1999, Bruxelas: Belgium Welding Institute. pp. 232-240.
12. CORRÊA, J. G. **Usinabilidade de aços inoxidáveis martensíticos aplicados na indústria de petróleo**. 2014. 213f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
13. RENAUDOT, N.; MANTEL, M.; VIANA, A. S. **Uma visão geral dos fatores metalúrgicos que influenciam na usinabilidade dos aços inoxidáveis e as diferentes formas de melhorá-la**. Núcleo Inox, São Paulo, n. 8, p. 325-322. Disponível em: <[http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/inox08/pg\\_325-332.pdf](http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/inox08/pg_325-332.pdf)>. Acesso em: 25/06/2015.
14. PAREDES, R. S. C. **Aços inoxidáveis metalurgia e soldagem**. Curitiba: Apostila UFPR, 2012.
15. DELLA ROVERE, C. A.; RIBEIRO, C.; SILVA, R.; BARONI, L. F. S.; ALCÂNTARA, N. G.; KURI, S. E. **Corrosion behavior of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes**. Materials And Design. Vol. 65, p. 318-327, 2015.
16. CARROUGE, D. **Transformations in supermartensitic stainless steels**. 2002. Tese (Doutorado). Departamento de Metalurgia e Ciência dos Materiais, Universidade de Cambridge, Inglaterra, 2002.
17. WINDER, H.; TOUSSAINT, P. e COUDREUSE, L. **Past, present and future of weldable supermartensitic alloys**. In: Supermartensitic Stainless World Conference e Expo, p. 232-240, Belgium, 2002.
18. XIONG, Y.; HE, T.; WANG, J. E. A. **Cryorolling effect on microstructure and mechanical properties of Fe-25Cr-20Ni austenitic stainless steel**. Material and Design. Vol. 88, pp. 398-405, 2015

19. SALES, V. **Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 E SAE 2205 em diferentes condições de dobramentos**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2013.
20. CHAGAS, G. M. P.; BARBOSA, P. A.; BARBOSA, C. A.; MACHADO, I. F. **Thermal analysis of the chip formation in austenitic stainless steel**. Procedia CIRP 8. 6p. 2013.
21. KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Londres: Editora Springer, 2011. 517 p.
22. SSINA – SPECIALITY STEEL INDUSTRY OF NORTH AMERICA. **Stainless steel for machining**. 11f, 1995
23. GRAVALOS, M. T. **Efeitos da usinagem na integridade superficial de um aço inoxidável superaustenítico**. 2008. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
24. MA, X. P.; WANG L. J.; LIU C, M.; SUBRAMANIAN, S. V. **Effect of N on microstructure and mechanical properties of 16Cr5Ni1Mo martensitic stainless steel**. Materials and Design. 8p. 2012.
25. ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal cutting**. 1. ed. Elsevier, 2006.
26. INTERNACIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION - IMOA. **Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steel**. 1 ed. Londres: IMOA, 2009. 64 p.
27. SHAW, M. C. **Metal cutting Principles**. USA: Oxford University Publications, 1986. 594p.
28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 513: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas — Designação dos grupos principais e grupos de aplicação**. Rio de Janeiro, 2013. 4p.

29. SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting: a practical handbook**. Sweden: Sandvik Coromant Technical Editorial, 2005.
30. FERNÁNDEZ-ABIA, A. I.; BARREIRO, J.; FERNÁNDEZ-LARRINOVA, J.; LÓPEZ DE LACALLE, L. N.; FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO, A.; PEREIRA, O. M. **Behaviour of PVD coatings in the turning of austenitic stainless steels**. Procedia Engineering. Vol. 63, p. 133-141, 2013.
31. DIN 6581: **Begriffe der Zerspantechnik: Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeugs**. Beuth, Berlin (1985)
32. ISO 3002:1 **Basic quantities in cutting and grinding - Part 1: Geometry of the active part of cutting tools - General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers**, 1982.
33. ATLATI, S.; HADDAG, B.; NOUARI, M.; MOUFKI A. **Effect of the local friction and contact nature on the Built-Up Edge formation process in machining ductile metals**. Tribology International. Vol. 90, p. 217 - 227, 2015.
34. NOORDIN, M. Y.; VENKATESH, V. C. ; SHARIF, S. **Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools**. Journal of Materials Processing Technology. n. 185, p. 83–90, 2007.
35. KORKUT, I.; KASAP, M.; CIFTCI, I.; SEKER, U. **Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel**. Journal of Materials and Design. n. 25, p. 303–305, 2004.
36. BARBOSA, P. A. **Estudo do comportamento mecânico da usinagem de aços inoxidáveis**. 2014. 235 f. Tese ( Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, 2014.
37. KULKARNI, A. P.; JOSHI, G. G.; SARGADE, V. G. **Dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using AlTiCrN coated insert produced by HPPMS technique**. Procedia Engineering. Vol. 64, p. 737-746, 2013.

38. NAVES, V. T. G. **Usinagem do aço inoxidável austenítico ABNT 316 UF com aplicação de fluido de corte a alta pressão**. 2013. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2013
39. RIBEIRO, R.A.M; GONÇALVES, R.A.; MACHADO, Á. R. **Investigação das Propriedades e Dimensões da Zona de Fluxo na Usinagem de Metais**. In: VI COBEF, 2011, Caxias do Sul - RS. Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, p. 1-10.
40. E SILVA, F. C. S. **Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304 a partir do estudo da formação do cavaco**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2007
41. LUCAS, E. O.; WEINGAERTNER, W. L. **Uma contribuição para o entendimento da formação do cavaco no torneamento do ferro fundido nodular ferrítico**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005, Joinville. Anais do COBEF. Joinville: Machining on line, 2005. v. 1.
42. CHERN, G. L. **Development of a new and simple quick-stop device for the study on chip formation**. Machine Tools e Manufacture. Vol. 45, p 789-794, 2005
43. CHILDS, T. H. C. **Towards simulating built-up-edge formation in the machining of steel**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Vol.4, p 57 – 70, 2011
44. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3685: Tool - life testing with single-point turning tools, 1993. 48p.
45. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blücher, 1977.
46. KOYEE, R. D.; EISSELER, R.; SCHMAUDER, S. **Application of Taguchi coupled fuzzy multi attribute decision making (FMADM) for optimizing surface quality in turning austenitic and duplex stainless steel**. Measurement. Vol. 58, p. 375-386, 2014.

47. KRONENBERG, M. **Machining Science and Application**. 1ª edição. Londres: Pergamon Press. 1966, 405 p.
48. FANG, N. **Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool**. *Wear*. Vol. 258, p 890 – 897, 2004.
49. MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por arranque de viruta**. Barcelona: Editora Blume, 1980. 334p.
50. CHAGAS, G. M. P.; MACHADO, I. F. **Design Numerical model of machining considering the effect of MnS inclusions in an austenitic stainless steel**. *Procedia CIRP*. Vol. 31, p 533 – 538, 2015.
51. CORRÊA, J. G.; BRITO, J. V. F. d.; SCHROETER R. B.; MACHADO, A. R. **Análise da microestrutura do cavaco proveniente da usinagem de um aço inoxidável martensítico AISI 410**. XVIII Colóquio de Usinagem. 3 f, 2014.
52. SATHEESHA, M.; JAIN, V. K.; KUMAR, P. **Design and development of a quick-stop device**. *Precision Engineering*. Vol. 12, p 205 – 212, 1990.
53. WU, C. L.; WANG K. S.; TSAI, L. C. **A new electromagnetic quick stop device for metal cutting studies**. *Advances Manufacturing Technology*. Vol. 29, p 853 – 859, 2006
54. MORENO, D. A. N. **Validação de um dispositivo de interrupção súbita da furação com brocas helicoidais para análise da raiz de cavaco**. 2012. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2012.
55. GOMES, J. O. **Características da usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316 com a variação dos parâmetros metalúrgicos**. 1996. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1996



56. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 6507-1:2008 **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers Parte 1: Método de Ensaio**, Rio de Janeiro, 2008, p. 22.
57. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 6508-1:2008 **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2008, p. 27.
58. CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Abordagem Integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006. 702 p.
59. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. ampl. e rev. São Paulo: ABM, 2012.
60. METALS HANDBOOK. **Machining**. 9 ed. USA: ASM International, 1989. v.16. 1989p.
61. CHILDS, T. H. C.; MAEKAWA, T.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. **Metal Machining: Theory and Applications**. 1º ed.. London: Arnolds, 2000. 408 p.
62. DAVIM, J. **Surface Integrity in Machining**. 1 ed. Londres: Editora Springer, 2010. 222 p.
63. B. Griffiths. **Manufacturing Surface Technology**. London: Penton Press, 2001.
64. M. A. DA SILVA. **Estudo do contato entre material da peça e superfície de folga da ferramenta de usinagem**. 2014. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
65. M. A. Islam, Z. Farhat; J. Bonnel. **High Pressure Water-Jet Technology for the Surface Treatment of Al-Si Alloys and Repercussion on Tribological Properties**. Journal of Surface Engineered Materials and Advances Technology. 2011

66. SOUZA, M. N. **Influência das Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio Usinabilidade – Foco no Grau de Recalque, na Dimensão da Zona de Fluxo e na Microdureza dos cavacos.** 2013. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
67. BUBANI, F. C. et al. **Efeito da temperatura e do teor de níquel nas propriedades mecânicas e a correlação com usinabilidade em ligas Fe-18Cr-Ni.** Revista Escola de Minas, v. 63, p. 185-190, 2010.
68. MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers.** 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
69. INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 4° ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 494 P.

## APÊNDICE A – Resultados das filmagens com a câmera de alta velocidade

As Figuras A.1, A.2 e A.3 representam os resultados das filmagens com a intensidade 1.

Figura A.1 – Deslocamento da ferramenta em Y (m) em função do tempo (ms)

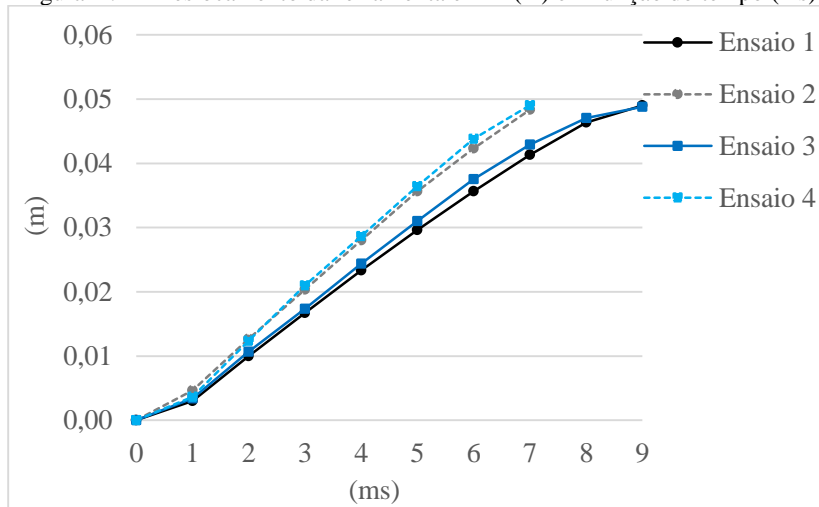


Figura A.2 – Velocidade de retração da ferramenta (m/s) em função do tempo (ms)

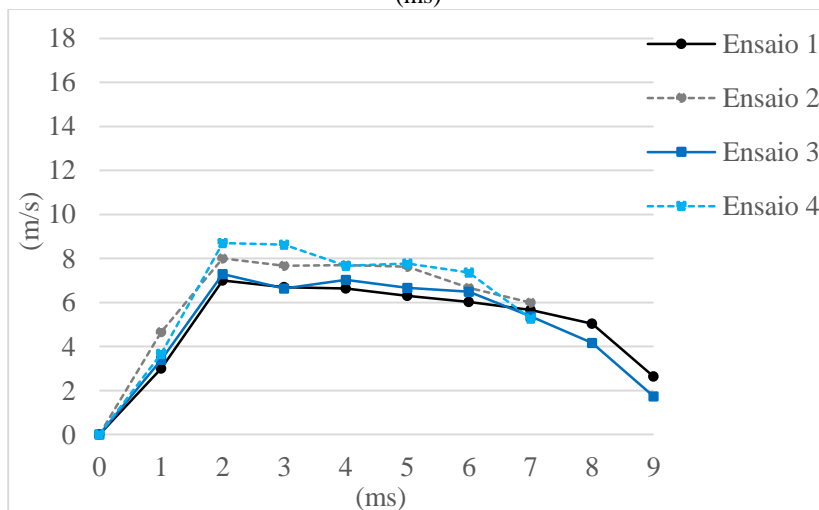
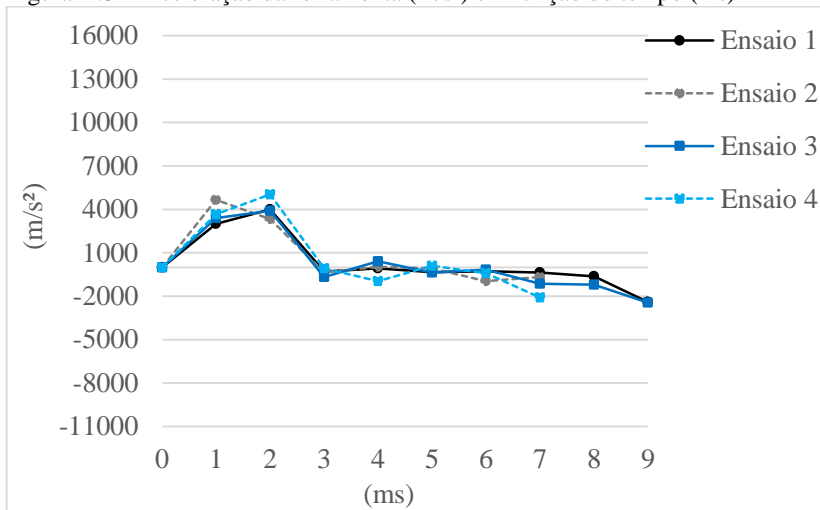


Figura A.3 – Aceleração da ferramenta ( $m/s^2$ ) em função do tempo (ms)



As Figuras A.4, A.5 e A.6 representam os resultados das filmagens com a intensidade 2.

Figura A.4 – Deslocamento da ferramenta em Y (m) em função do tempo (ms)

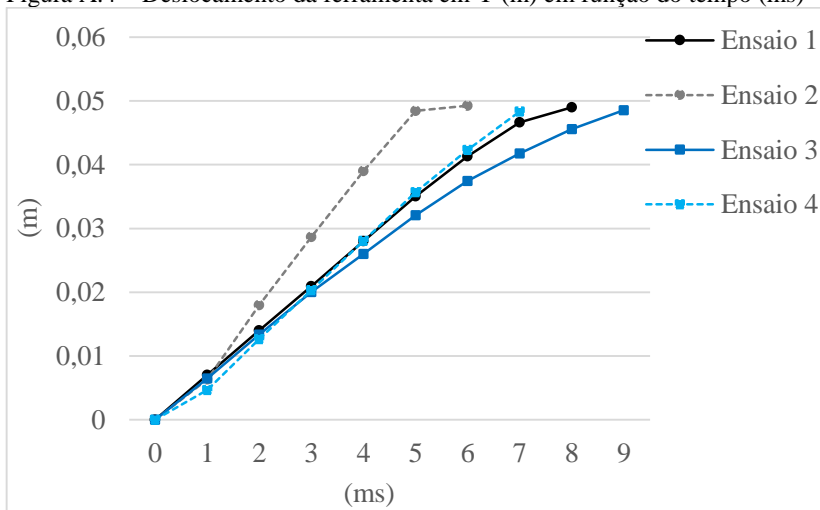


Figura A.5 – Velocidade de retração da ferramenta (m/s) em função do tempo (ms)

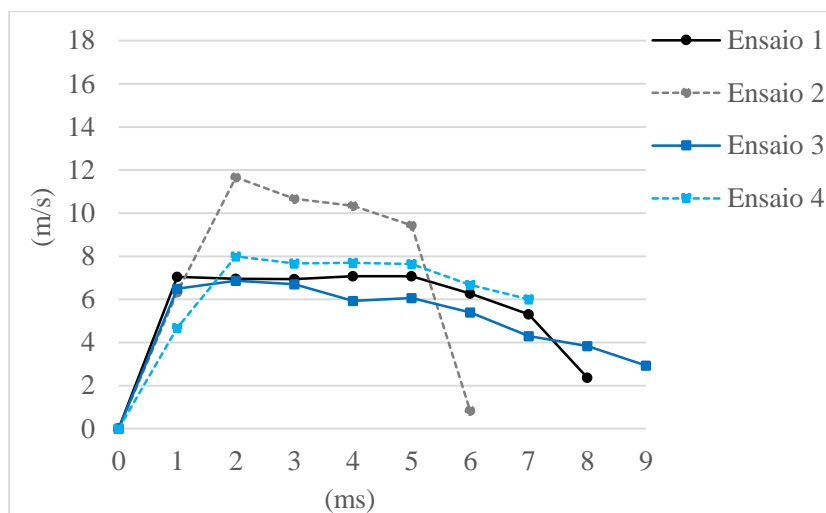
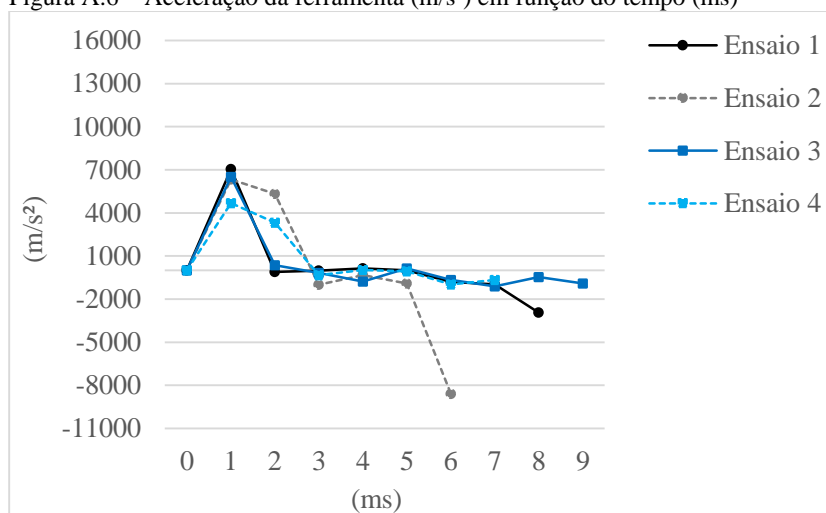


Figura A.6 – Aceleração da ferramenta (m/s<sup>2</sup>) em função do tempo (ms)



As Figuras A.7, A.8 e A.9 representam os resultados das filmagens com a intensidade 3.

Figura A.7 – Deslocamento da ferramenta em Y (m) em função do tempo (ms)

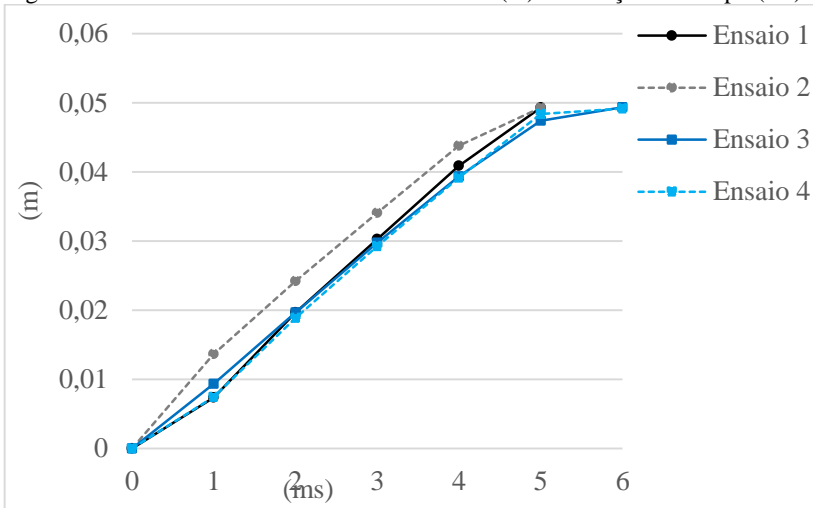


Figura A.8 – Velocidade de retração da ferramenta (m/s) em função do tempo (ms)

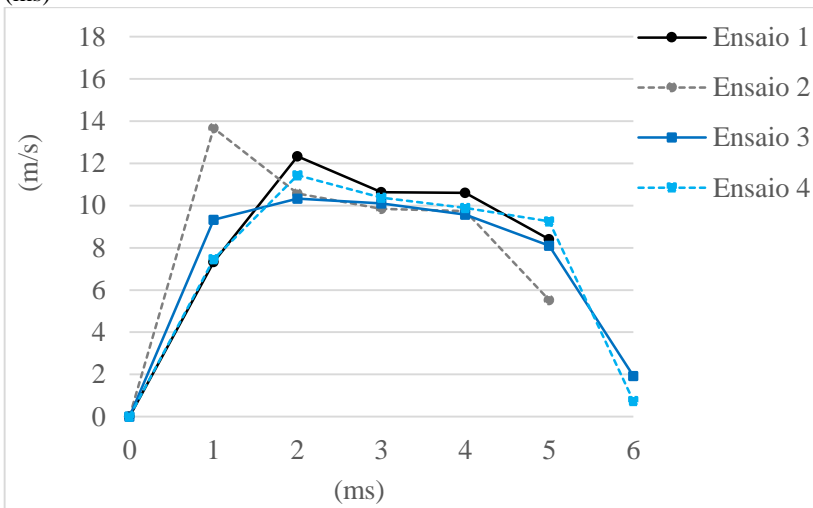
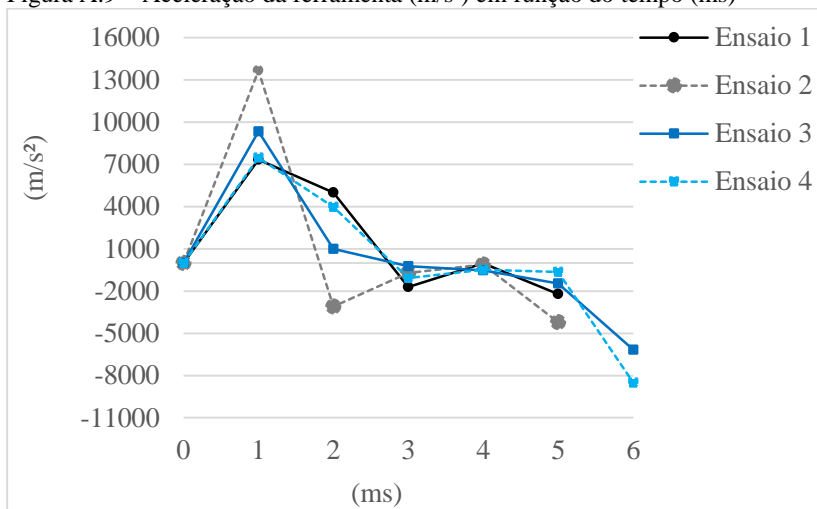


Figura A.9 – Aceleração da ferramenta ( $m/s^2$ ) em função do tempo (ms)



As Figuras A.10, A.11 e A.12 representam os resultados das filmagens com a intensidade 4.

Figura A.10 – Deslocamento da ferramenta em Y (m) em função do tempo (ms)

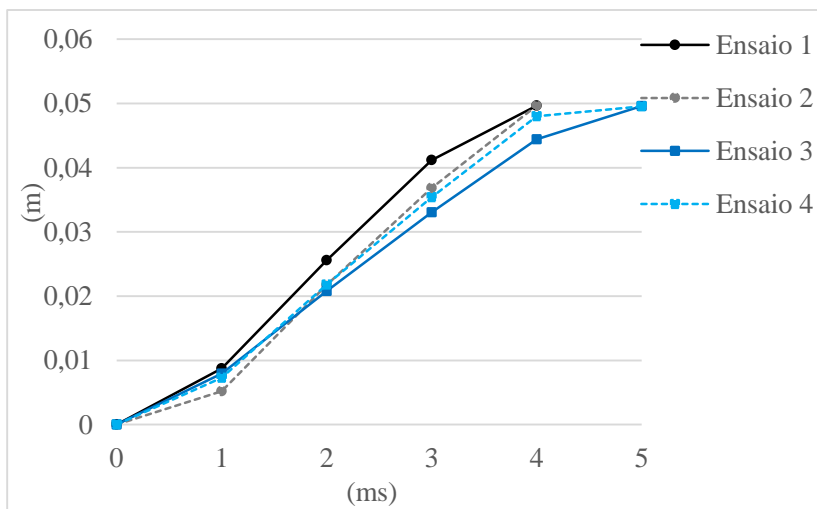


Figura A.11 – Velocidade de retração da ferramenta (m/s) em função do tempo (ms)

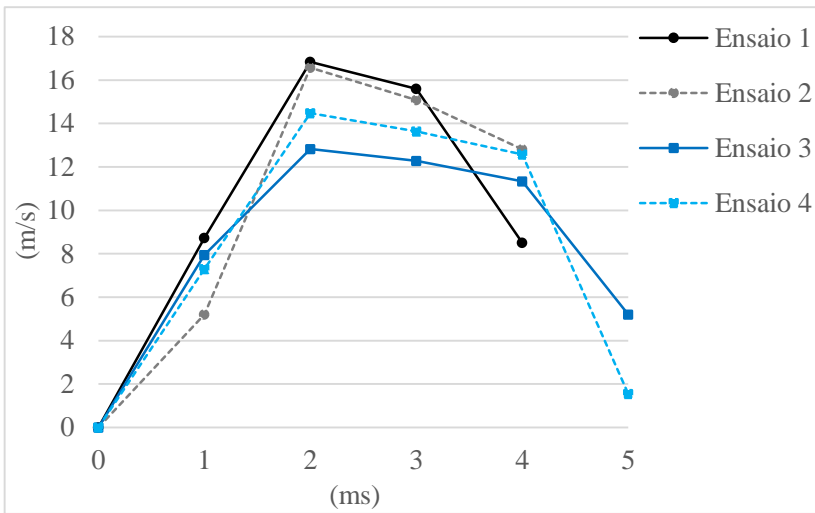
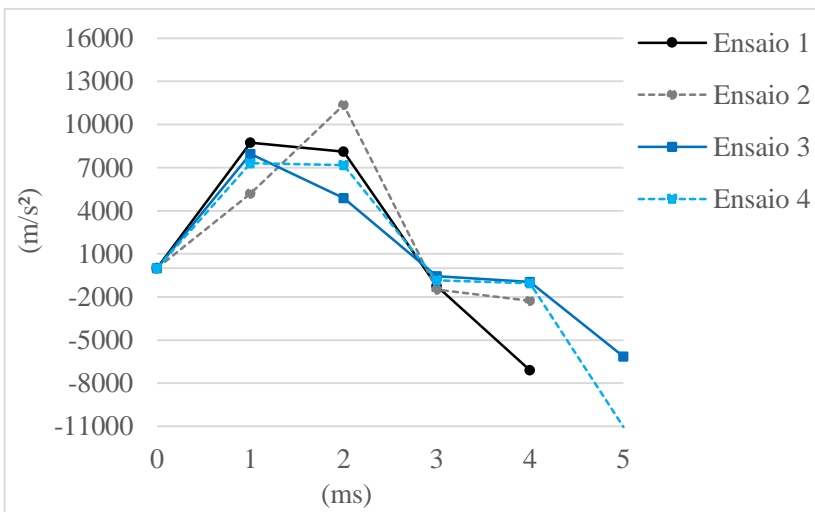


Figura A.12 – Aceleração da ferramenta (m/s<sup>2</sup>) em função do tempo (ms)





As Figuras A.13, A.14 e A.15 representam os resultados das filmagens com a intensidade 5.

Figura A.13 – Deslocamento da ferramenta em Y (m) em função do tempo (ms)

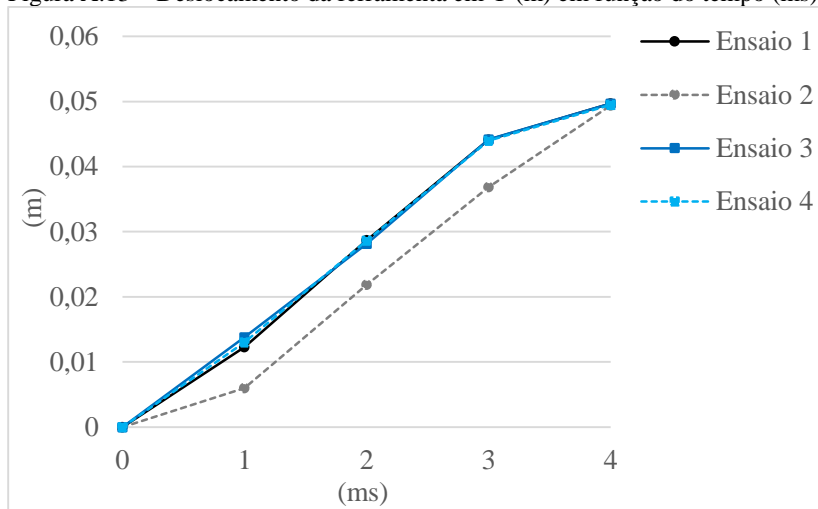


Figura A.14 – Velocidade de retração da ferramenta (m/s) em função do tempo (ms)

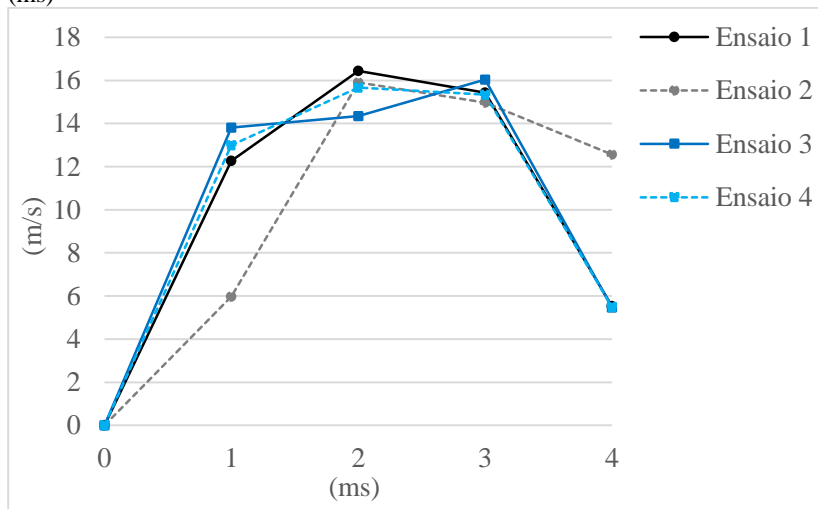
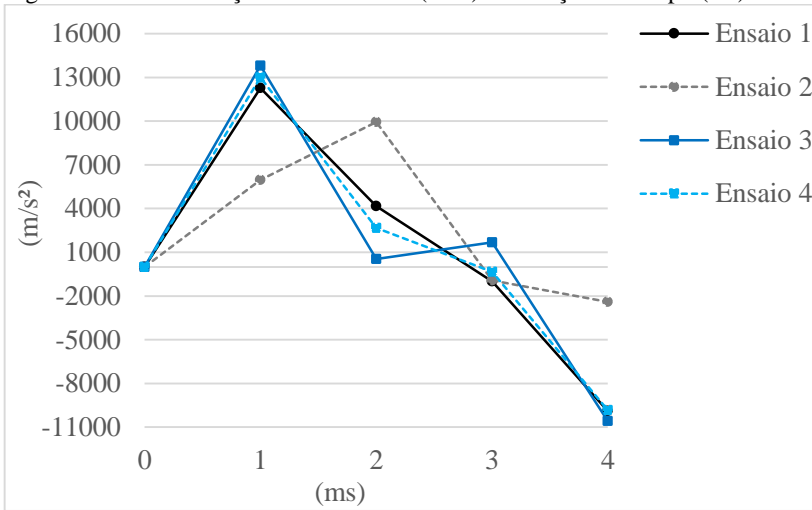


Figura A.15 – Aceleração da ferramenta ( $m/s^2$ ) em função do tempo (ms)

Uma filmagem realizada com câmera de alta velocidade do dispositivo QSD está disponível em <https://youtu.be/vtJERYiHGXo>.

## APÊNDICE B – Resultados das medições de microdureza

As tabelas a seguir contêm os valores da microdureza (conforme Figura 3.14) de acordo com a variação das condições de corte para cada material.

Tabela B.1 – Valores de microdureza do UNS S30400 com  $v_c$  de 20 m/min

Condições de corte	$v_c$ (m/min)	20	20	20	20	20	20
	f (mm)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	$a_p$ (mm)	2	2	2	2	2	2
Microdureza (HRC)	Ponto 1	34,5	32,3	33,4	27,2	28,1	27,6
	Ponto 2	37,5	28,1	32,8	27,2	26,8	27,0
	Ponto 3	34,4	29,3	31,8	24,5	26,2	25,3
	Ponto 4	33,4	27,0	30,2	24,4	27,7	26,0
	Ponto 5	32,5	29,6	31,1	28,8	27,1	27,9
	Ponto 6	46,3	37,4	41,9	43,8	33,1	38,4
	Ponto 7	39,4	30,6	35,0	38,6	27,2	32,9
	Ponto 8	42,7	47,2	45,0	47,4	39,9	43,6
	Ponto 9	44,0	49,5	46,8	40,0	40,3	40,1
	Ponto 10	42,0	49,6	45,8	37,3	42,4	39,8

Tabela B.2 – Valores de microdureza do UNS S30400 com  $v_c$  de 120 m/min

Condições de corte	$v_c$ (m/min)	120	120	120	120	120	120
	f (mm)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	$a_p$ (mm)	2	2	2	2	2	2
Microdureza (HRC)	Ponto 1	35,8	33,1	34,4	32,7	26,5	29,6
	Ponto 2	33,5	30,1	31,8	29,6	25,5	27,5
	Ponto 3	34,3	34,0	34,1	31,0	25,0	28,0
	Ponto 4	34,3	32,1	33,2	30,2	25,6	27,9
	Ponto 5	36,4	32,0	34,2	31,0	25,5	28,2
	Ponto 6	35,1	34,1	34,6	35,6	30,8	33,2
	Ponto 7	32,0	30,0	31,0	32,1	29,5	30,8
	Ponto 8	36,3	42,5	39,4	33,4	35,1	34,2
	Ponto 9	38,5	35,6	37,0	34,7	36,2	35,4
	Ponto 10	39,1	38,5	38,8	37,4	34,8	36,1

Tabela B.3 – Valores de microdureza do UNS S30400 com  $v_c$  de 220 m/min

Condições de corte	$v_c$ (m/min)	220	220	220	220	220	220
	f (mm)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	$a_p$ (mm)	2	2	2	2	2	2
Microdureza (HRC)	Ponto 1	24,2	28,1	26,1	27,7	27,0	27,3
	Ponto 2	23,6	24,5	24,0	26,0	26,5	26,2
	Ponto 3	28,8	26,1	27,4	26,1	26,6	26,3
	Ponto 4	23,7	27,1	25,4	25,6	25,5	25,5
	Ponto 5	23,7	24,0	23,8	26,5	26,2	26,3
	Ponto 6	26,6	29,5	28,8	27,4	30,3	28,8
	Ponto 7	32,1	28,0	30,0	28,2	28,6	28,4
	Ponto 8	32,0	33,5	32,7	33,8	30,4	32,1
	Ponto 9	34,1	31,7	32,9	39,2	30,0	34,6
	Ponto 10	36,7	32,1	34,4	35,7	34,4	35,0

Tabela B.4 – Valores de microdureza do UNS S41426 com  $v_c$  de 20 m/min

Condições de corte	$v_c$ (m/min)	20	20	20	20	20	20
	f (mm)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	$a_p$ (mm)	2	2	2	2	2	2
Microdureza (HRC)	Ponto 1	31,8	28,7	30,2	27,0	26,8	26,9
	Ponto 2	29,7	27,8	28,7	27,4	26,4	26,9
	Ponto 3	31,1	33,1	32,1	27,0	29,6	28,3
	Ponto 4	27,2	31,1	29,1	28,1	28,2	28,0
	Ponto 5	33,0	39,0	36,0	28,1	29,1	28,6
	Ponto 6	42,1	41,3	35,0	30,2	34,6	32,4
	Ponto 7	45,6	40,9	43,2	28,8	29,8	29,3
	Ponto 8	41,3	44,6	42,9	41,2	40,7	40,9
	Ponto 9	41,7	43,2	42,4	40,5	36,1	38,3
	Ponto 10	41,2	45,6	43,4	36,8	45,7	41,2

Tabela B.5 – Valores de microdureza do UNS S41426 com  $v_c$  de 120 m/min

Condições de corte	$v_c$ (m/min)	120	120	120	120	120	120
	f (mm)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	$a_p$ (mm)	2	2	2	2	2	2
Microdureza (HRC)	Ponto 1	32,1	30,9	31,5	34,2	28,0	31,1
	Ponto 2	29,1	28,0	28,5	34,2	27,0	30,6
	Ponto 3	33,3	32,1	32,7	34,8	27,8	31,3
	Ponto 4	31,5	31,2	31,4	32,1	26,5	29,3
	Ponto 5	29,0	30,8	29,9	30,6	26,5	28,5
	Ponto 6	33,2	31,6	32,4	31,2	29,0	30,1
	Ponto 7	26,0	31,5	28,8	30,8	28,5	29,6
	Ponto 8	37,4	32,2	34,8	39,2	30,1	34,6
	Ponto 9	37,5	33,2	35,4	33,1	30,5	31,8
	Ponto 10	35,6	30,8	33,2	34,8	32,1	33,4

Tabela B.6 – Valores de microdureza do UNS S41426 com  $v_c$  de 220 m/min

Condições de corte	$v_c$ (m/min)	220	220	220	220	220	220
	f (mm)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	$a_p$ (mm)	2	2	2	2	2	2
Microdureza (HRC)	Ponto 1	28,5	29,6	29,0	34,2	28,0	31,1
	Ponto 2	28,6	26,2	27,4	34,2	27,0	30,6
	Ponto 3	32,4	28,3	30,3	34,8	27,8	31,3
	Ponto 4	29,2	28,6	28,9	32,1	26,5	29,3
	Ponto 5	29,1	30,5	29,8	30,6	26,5	28,5
	Ponto 6	30,8	31,6	31,2	31,2	29,0	30,1
	Ponto 7	28,0	28,7	28,3	30,8	28,5	29,6
	Ponto 8	32,3	36,7	34,5	39,2	30,1	34,6
	Ponto 9	42,3	32,2	37,2	33,1	30,5	31,8
	Ponto 10	31,7	40,0	35,8	34,8	32,1	33,4