



Universidade de Aveiro
2013

Departamento de Engenharia Mecânica

Ulisses Gomes

Análise da maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316



Ulisses Gomes

Análise da maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Auxiliar com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha mãe, Helena Gomes Lopes, às minhas irmãs e ao meu irmão, pelo incansável apoio e pelo acompanhamento do meu esforço ao longo deste percurso.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Auxiliar, com Agregação, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Neste trabalho quero agradecer:

Em primeiro lugar, ao meu bom Deus, por me proporcionar esta vitória.

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva com quem tive o prazer e o privilégio de trabalhar, pela orientação, disponibilidade, paciência e amizade ao longo desta etapa.

Ao Engenheiro António Festas, pelos ensinamentos, esclarecimentos e ajuda prestada nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica.

A todos os professores do departamento de engenharia mecânica da Universidade de Aveiro, pelos conhecimentos transmitidos durante o meu percurso académico.

À minha família, à minha namorada e aos meus amigos, que de uma forma direta ou indireta me ajudaram, dando apoio, motivação e incentivo para chegar ao fim deste percurso da minha vida, assim como sugestões que ajudaram a enriquecer este trabalho.

Aos Serviços de Ação social da Universidade de Aveiro (SASUA) e à Câmara Municipal de Aveiro (CMA), pelos apoios concedidos ao longo desses anos da minha formação e estadia em Aveiro.

Palavras-chave

Aço inoxidável austenítico, maquinagem, torneamento, ferramentas de corte, acabamento de superfície, desgaste de ferramenta.

Resumo

No presente trabalho realizou-se um estudo sobre a maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316, em operações de torneamento, usando dois tipos diferentes de ferramentas de corte, uma revestida e com quebra-apara (M25) e outra sem revestimento e com quebra-apara (P25). O estudo foi desenvolvido em duas fases distintas.

Numa primeira fase foi avaliado o acabamento da superfície da peça maquinada e a forma das aparas obtidas, recorrendo aos ensaios de corte curtos.

Na segunda fase foi avaliado o acabamento da superfície da peça maquinada, o desgaste das ferramentas de corte (VB), a forma das aparas obtidas e obtidas curva de vida da ferramenta segundo o modelo de Taylor, recorrendo aos ensaios de corte longos.

Em ambas as fases foram verificados quais os efeitos dos parâmetros de corte, tais como, o avanço, a velocidade de corte e o revestimento da ferramenta, na qualidade da superfície obtida. Nos ensaios de corte curtos foi ainda analisado o efeito do uso de fluido de corte na maquinagem.

Verificou-se que a ferramenta revestida e com quebra-apara (M25) usada nos ensaios efetuados é uma solução viável para a maquinagem do aço inoxidável AISI 316, produzindo superfícies maquinadas com elevada precisão dimensional, aparas curtas, e possui uma boa resistência ao desgaste, o que faz com que tenha maior tempo de vida.

Keywords

Austenitic stainless steel, machining, turning, cutting tools, surface finish, tool wear.

Abstract

In the current dissertation was carried out a study on the machinability of AISI 316 stainless steel in turning operations. For this process we used two different types of cutting tools: one coated and with chip breaker (M25) and one uncoated and with chip breaker (P25). The study was conducted in two different phases.

On a first stage we evaluated the surface finishing of the workpiece and the form of chips obtained by using short cutting tests.

On the second stage was measured the surface finish of the workpiece, the wear of the cutting tools (VB), the form of chips obtained and obtained the tool life curve according Taylor model, using long cutting tests.

On both stages it was verified what are the effects of the cutting parameters, such as the cutting feed, the cutting speed and the coating tool in surface quality obtained. In short cutting tests were also examined the effect of using lubricant in the machinery.

It was found that the coated tool and with chip breaker (M25) used in the tests conducted is a viable solution for machining of stainless steel AISI 316, producing machined surfaces with high dimensional accuracy, short chips and has a good wear resistance which means it has a longer life.

Índice

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas.....	vi
Acrónimos e siglas	viii
1 Introdução.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos do trabalho	2
1.3 Organização do trabalho	4
2 Revisão bibliográfica - Maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316.....	5
2.1 Introdução	5
2.1.1 Composição química	5
2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas.....	6
2.1.3 Tratamentos térmicos nos aços inoxidáveis AISI 316	6
2.1.4 Campo de aplicações.....	7
2.2 Maquinagem do aço inoxidável AISI 316	8
2.2.1 Parâmetros e ferramentas de corte.....	8
2.2.1.1 Parâmetros de corte.....	9
2.2.1.2 Ferramentas de corte	9
2.2.2 Fluido de corte (lubrificação/Refrigeração).....	10
2.2.3 Condições de corte testadas.....	11
2.3 Maquinabilidade.....	15
2.3.1 Aparar e mecanismo de formação	16
2.3.2 Forças de corte	20
2.3.3 Temperaturas de corte.....	21
2.3.4 Desgaste e vida das ferramentas de corte	22
2.3.5 Integridade superficial/precisão dimensional	27
2.4 Síntese.....	32
3 Metodologia Experimental	33
3.1 Considerações Gerais.....	33
3.2 Material ensaiado	33
3.3 Ferramentas de corte.....	34
3.4 Máquina-ferramenta	35
3.5 Parâmetros de corte para os diversos tipos de ensaios de corte.....	37

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

3.5.1	Estratégia de corte	38
3.6	Métodos de caracterização de superfície	39
3.6.1	Acabamento de superfície.....	39
3.6.2	Medição do desgaste da ferramenta	41
3.6.3	Caracterização da apara	43
3.7	Síntese.....	43
4	Análise e Discussão de Resultados	45
4.1	Análise de maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 (ensaios de corte curtos)	45
4.1.1	Forma de aparas obtidas	45
4.1.1.1	Aparas obtidas com a Ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara)	46
4.1.1.2	Aparas obtidas com a Ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara)	49
4.1.2	Integridade superficial/precisão dimensional	52
4.1.2.1	Integridade superficial/precisão dimensional obtida com a Ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) na maquinagem a seco e com fluido de corte	52
4.1.2.2	Integridade superficial/precisão dimensional obtida com a Ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) na maquinagem a seco e com fluido de corte.....	56
4.2	Análise de maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 (ensaios de corte longos)	61
4.2.1	Forma de aparas obtidas	61
4.2.2	Integridade superficial.....	63
4.2.3	Desgaste e vida da ferramenta de corte	67
5	Considerações Finais.....	71
5.1	Conclusões gerais	71
5.2	Trabalhos futuros.....	72
	Referências Bibliográficas	73
6	Anexo.....	80

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 - QUANTIDADE DE ARTIGOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS ENTRE 2002 E 2013, COM ESTUDOS EFETUADOS NA ÁREA DA MAQUINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316.....	2
FIGURA 2.1 - MÉTODOS ECOLÓGICOS DE LUBRIFICAÇÃO/REFRIGERAÇÃO (KELLY ET AL., 2002).....	11
FIGURA 2.2 - PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A MAQUINABILIDADE.....	15
FIGURA 2.3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CORTE POR ARRANQUE DE APARA; A) CORTE OBLÍQUO; B) CORTE ORTOGONAL (MERCHANT, 1944).....	17
FIGURA 2.4 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DE APARA: A) REPRESENTAÇÃO BIDIMENSIONAL DO CORTE ORTOGONAL, ILUSTRANDO OS PRINCIPAIS PARÂMETROS; B) ZONAS DE CORTE (ADAPTADO DE CANGUNDO M. E.,2009).....	18
FIGURA 2.5 - FORMA DE APARA OBTIDA PARA O AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L A) POR ANÁLISE EXPERIMENTAL; B) POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA (OUTEIRO ET AL., 2006).....	19
FIGURA 2.6 - IMAGENS DA APARA OBTIDA COM DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE (SORENG A., 2011).....	19
FIGURA 2.7 – FORMAS DE DESGASTE TÍPICAS DAS FERRAMENTAS SEGUNDO A ISO 3685/ 1993.....	23
FIGURA 2.8 - DESGASTES E AVARIAS COMUNS NAS FERRAMENTAS DE CORTE (ADAPTADO DE ASTAKHOV ET DAVIM J. P., 2008).....	24
FIGURA 2.9 – MECANISMOS DE DESGASTE DA FERRAMENTA (KÖNIG, W. ET KLOCKE, F., 1997).....	24
FIGURA 2.10 – VARIAÇÃO DO DESGASTE COM A VELOCIDADE DE CORTE ($V_3 > V_2 > V_1$) (KÖNIG, W. ET KLOCKE F., 1997).....	25
FIGURA 2.11 - ESQUEMA DA DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS RA E RT DE ACORDO COM A NORMA ISO/DIS 4287/1.....	28
FIGURA 3.1 - ASPETO DO PROVETE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	33
FIGURA 3.2 – PORTA- FERRAMENTA UTILIZADO NOS ENSAIOS (SANDVIK, 2002).....	34
FIGURA 3.3 - PASTILHAS DE CORTE UTILIZADAS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS A) DCMT 11 T03 04-UM (REVESTIDA), B) DCMT 11 T03 04 - PF (SEM REVESTIMENTO).....	35
FIGURA 3.4 - TORNO CNC KINGSBURY MHP 50 INSTALADO NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA MECÂNICA DO DEM DA UNIVERSIDADE DE AVEIRO (CORTESIA DO DEM-UA).....	35
FIGURA 3.5 - BUCHA E TORRETA DO TORNO CNC KINGSBURY MHP 50 (CORTESIA DO DEM-UA).....	36
FIGURA 3.6 – ILUSTRAÇÃO DOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS.....	38
FIGURA 3.7 - ILUSTRAÇÃO DOS ENSAIOS DE CORTE LONGOS.....	39
FIGURA 3.8 - MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DO PROVETE DE ENSAIO (AÇO INOXIDÁVEL AISI 316) COM O RUGOSÍMETRO HOMMEL TESTER T1000 E (CORTESIA DEM-UA).....	40

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

FIGURA 3.9 - PONTOS DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.	40
FIGURA 3.10 – FORMAS DE DESGASTE TÍPICAS DAS FERRAMENTAS SEGUNDO A ISO 3685/1993.	41
FIGURA 3.11 - MICROSCÓPIO DE OFICINA MITUTOYO TM (CORTESIA DEM-UA).	42
FIGURA 3.12 - MICROSCÓPIO ÓTICO NIKON ECLIPSE LV150 (CORTESIA DEM- UA).....	42
FIGURA 3.13 - FORMAS DE APARA SEGUNDO A NORMA ISO 3685/1993.	43
FIGURA 3.14 - ORGANIGRAMA DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL.....	44
FIGURA 4.1 – APARAS OBTIDAS (1,5X) NO ENSAIO DE CORTE CURTO COM A FERRAMENTA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA), $V_c=300$ M/MIN, $P=1$ MM; A) A SECO; B) COM FLUIDO DE CORTE.....	46
FIGURA 4.2 – APARAS OBTIDAS (1,5X) NO ENSAIO DE CORTE CURTO COM A FERRAMENTA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA), $V_c=150$ M/MIN, $P=1$ MM; A) A SECO; B) COM FLUIDO DE CORTE.....	47
FIGURA 4.3 – APARAS OBTIDAS (1,5X) NO ENSAIO DE CORTE CURTO COM A FERRAMENTA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA), $V_c=75$ M/MIN, $P=1$ MM; A) A SECO; B) COM FLUIDO DE CORTE.....	48
FIGURA 4.4 – APARAS OBTIDAS (1,5X) NO ENSAIO DE CORTE CURTO COM A FERRAMENTA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA), $V_c=300$ M/MIN, $P=1$ MM; A) A SECO; B) COM FLUIDO DE CORTE.	49
FIGURA 4.5 – APARAS OBTIDAS (1,5X) NO ENSAIO DE CORTE CURTO COM A FERRAMENTA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA), $V_c=150$ M/MIN, $P=1$ MM; A) A SECO; B) COM FLUIDO DE CORTE.	50
FIGURA 4.6 – APARAS OBTIDAS (1,5X) NO ENSAIO DE CORTE CURTO COM A FERRAMENTA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA), $V_c=75$ M/MIN, $P=1$ MM; A) A SECO; B) COM FLUIDO DE CORTE.	51
FIGURA 4.7 – SUPERFÍCIES MAQUINADAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS A SECO E COM FLUIDO DE CORTE, COM A FERRAMENTA M25; A) $A=0,05$ MM/ROT. ; B) $=0,1$ MM/ROT.; C) $=0,2$ MM/ROT.; D) $=0,4$ MM/ROT.	53
FIGURA 4.8 – EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA (RA) EM FUNÇÃO DO AVANÇO (A) PARA DIFERENTES	54
FIGURA 4.9 - EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE MÁXIMA (RT) EM FUNÇÃO DO AVANÇO (A) PARA DIFERENTES.....	55
FIGURA 4.10 – EVOLUÇÃO DE IT EM FUNÇÃO DO AVANÇO (A) PARA DIFERENTES	56
FIGURA 4.11 – SUPERFÍCIES MAQUINADAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS A SECO E COM FLUIDO DE CORTE, COM A FERRAMENTA P25; A) $A=0,05$ MM/ROT. ; B) $=0,1$ MM/ROT.; C) $=0,2$ MM/ROT.; D) $=0,4$ MM/ROT.....	57
FIGURA 4.12 - EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA (RA) EM FUNÇÃO DO AVANÇO (A) PARA DIFERENTES	58
FIGURA 4.13 – EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE MÁXIMA (RT) EM FUNÇÃO DO AVANÇO (A) PARA DIFERENTES	59
FIGURA 4.14 – EVOLUÇÃO DE IT EM FUNÇÃO DO AVANÇO (A) PARA DIFERENTES	60
FIGURA 4.15 – APARAS OBTIDAS (1,5X) NOS ENSAIOS LONGOS, COM $V_c=300$ M/MIN E $V_c=75$ M/MIN, $P=2$ MM E $A=0,05$ MM/ROT., A) M25 PASSAGEM INICIAL; B) M25 PASSAGEM FINAL; C) P25 PASSAGEM INICIAL; D) P25 PASSAGEM FINAL.....	62

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

FIGURA 4.16 – SUPERFÍCIES MAQUINADAS OBTIDAS NOS ENSAIOS LONGOS, COM $V_c=300$ M/MIN E $V_c=75$ M/MIN, $p=2$ MM E $A=0,05$ MM/ROT., A) M25 PASSAGEM INICIAL; B) M25 PASSAGEM FINAL; C) P25 PASSAGEM INICIAL; D) P25 PASSAGEM FINAL.	63
FIGURA 4.17 – EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA (RA) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE OBTIDAS NOS ENSAIOS LONGOS A SECO, COM AS FERRAMENTAS M25 E P25 E COM: A) $V_c=300$ M/MIN. E B) $V_c=75$ M/MIN.	64
FIGURA 4.18 – EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE MÁXIMA (Rt) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE OBTIDAS NOS ENSAIOS LONGOS A SECO, COM AS PASTILHAS M25 E P25 E COM: A) $V_c=300$ M/MIN. E B) $V_c=75$ M/MIN.	66
FIGURA 4.19 – EVOLUÇÃO DO DESGASTE (VB) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CORTE; UM $A=0,1$ MM/ROT., UM $p=2$ MM.; A) $V_c=300$ M/MIN; B) $V_c=75$ M/MIN.	67
FIGURA 4.20 – DESGASTE DA FERRAMENTA OBSERVADO (5X) NO MICROSCÓPICO NIKON ECLIPSE LV 150 PARA UM $A=0.1$ MM/ROT. E UM $p=2$ MM; A) $V_c=300$ M/MIN; B) $V_c=75$ M/MIN.	68
FIGURA 4.21 – CURVA DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE M25 E P25 PARA ENSAIOS DE CORTE A SECO.	70
FIGURA 6.1 – ÍNDICE DE MAQUINABILIDADE PARA DIFERENTES MATERIAIS.	86
FIGURA 6.2 – CLASSES DE QUALIDADE IT.	87
FIGURA 6.3 – CERTIFICADO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 USADO NOS ENSAIOS.	87

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇOS INOXIDÁVEIS DA FAMÍLIA DO AISI 316 (% EM PESO) (SWILL)	5
TABELA 2.2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316	6
TABELA 2.3 - PARÂMETROS E AS FERRAMENTAS DE CORTE TESTADOS POR DIVERSOS AUTORES NA MAQUINAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 316 E AISI 316L.	12
TABELA 2.4 - MORFOLOGIA DAS APARAS (SORENG A., 2011).....	20
TABELA 2.5 - VALORES LIMITES DE DESGASTE RECOMENDÁVEIS NA PRÁTICA, PARA DIFERENTES MATERIAIS DE FERRAMENTA (FERRARESI, 1989).	25
TABELA 2.6 - OS VALORES DE N OBSERVADOS NA PRÁTICA DE DIVERSOS MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE (ASTAKHOV E DAVIM J. P., 2008).	26
TABELA 3.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 USADO NOS ENSAIOS.	34
TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 USADO NOS ENSAIOS.	34
TABELA 3.3 – IDENTIFICAÇÃO E GEOMETRIA DE CORTE DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS (SANDVIK, 2010).	34
TABELA 3.4- CARACTERÍSTICAS DO TORNO CNC KINGSBURY MHP 50.	36
TABELA 3.5 – PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS.	37
TABELA 3.6 - PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE CORTE LONGOS	37
TABELA 4.1 – QUADRO RESUMO DA CLASSIFICAÇÃO DA FORMA DAS APARAS OBTIDAS NOS ENSAIOS CURTOS.....	52
TABELA 4.2 — TEMPO DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE USADAS NOS ENSAIOS.	69
TABELA 4.3 – VALORES DAS CONSTANTES DE TAYLOR, OBTIDOS PARA AS FERRAMENTAS M25 E P25	70
TABELA 6.1 – PROGRAMA CNC UTILIZADO PARA EFETUAR O DEBASTE NA PEÇA INICIAL.	80
TABELA 6.2 – PROGRAMA CNC UTILIZADO NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS.	80
TABELA 6.3 – PROGRAMA CNC UTILIZADO NOS ENSAIOS DE CORTE LONGOS.....	81
TABELA 6.4 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS A SECO, COM A FERRAMENTA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA).	81
TABELA 6.5 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS COM LUBRIFICAÇÃO, COM A PASTILHA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA).....	81
TABELA 6.6 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS A SECO, COM A PASTILHA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA).....	82
TABELA 6.7 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE CURTOS COM LUBRIFICAÇÃO, COM A PASTILHA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA).	82

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

TABELA 6.8 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E DO DESGASTE DE FERRAMENTA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE LONGOS A SECO, COM A PASTILHA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA) E COM A $V_c=300$ M/MIN.	83
TABELA 6.9 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E DO DESGASTE DE FERRAMENTA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE LONGOS A SECO, COM A PASTILHA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA) E COM A $V_c=75$ M/MIN.	83
TABELA 6.10 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E DO DESGASTE DE FERRAMENTA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE LONGOS A SECO, COM A PASTILHA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA) E COM A $V_c=300$ M/MIN.	84
TABELA 6.11 – PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E DO DESGASTE DA FERRAMENTA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CORTE LONGOS A SECO, COM A FERRAMENTA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA) E COM A $V_c=75$ M/MIN.	85
TABELA 6.12 – VALORES DE IT NORMALIZADOS.	85
TABELA 6.13 – VALORES DE IT CALCULADOS PARA A FERRAMENTA M25 (REVESTIDA E COM QUEBRA-APARA)	86
TABELA 6.14 – VALORES DE IT CALCULADOS PARA A FERRAMENTA P25 (SEM REVESTIMENTO E COM QUEBRA-APARA).....	86

Acrónimos e siglas

a	Avanço de corte
AISI	<i>“American Iron and Steel Institute”</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio (Alumina)
ASPN	<i>“Active Screen Plasma Nitriding”</i>
B	Dureza Rockwell
C	Carbono
C	Constante da lei de Taylor
cm ³ /min	Centímetro cúbico por minuto
CNC	<i>“Computer Numerical Control”</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Crómio
cv	Cavalo-vapor
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
e	Espessura da apara antes de corte
e'	Espessura da apara depois de corte
EP	Extrema Pressão
et al.	e outros (do Latim et alii)
FANUC	<i>“Fujitsu Automated Numerical Control”</i>
GPa	Giga Pascal
ISO	<i>“International Organization for Standardization”</i>
IT	Tolerância Internacional
J/kg K	Joule por quilograma e graus Kelvin
KB	Largura da cratera
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
KM	Eixo de corte da cratera

KT	Desgaste de cratera/ profundidade da cratera
kW	Kilowatts
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro
mm/mm °C	Milímetro por milímetro e graus Celcius
mm/rot	Milímetros por rotação
Mn	Manganês
Mo	Molibdénio
MPa	Mega Pascal
MQL	<i>“Minimal Quantities of Lubrication”</i>
n	Expoente da lei de Taylor
N	Nitrogénio
Ni	Níquel
P	Fósforo
p	Profundidade de corte
Pc	Picos existentes por casa centímetro
PIB	Produto Interno Bruto
PRE	<i>“Pretting Resistence Equivalente”</i>
Pt	Amplitude de perfil
PVD	Physical Vapour Deposition
Q	Taxa de remoção de material
R3z	Rugosidade média do terceiro pico ao terceiro vale
Ra	Rugosidade média aritmética
Rc	Grau de recalque
RmD	Rugosidade média norma DIN
RmJ	Rugosidade média norma Japonesa
Rp	Profundidade média de aplainamento

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

rpm	Rotação por minuto
Rq	Rugosidade média geométrica
Rt	Amplitude máxima da rugosidade
Rta	Rugosidade média aritmética teórica
Rtt	Amplitude máxima da rugosidade teórica
Rz	Profundidade média de rugosidade
RzD	Profundidade média de rugosidade norma DIN
RzI	Profundidade média de rugosidade norma ISO
RzJ	Profundidade média de rugosidade norma Japonesa
S	Enxofre
SEM	<i>“Scanning Electron Microscope”</i>
Si	Silício
Sm	Passo médio da rugosidade
t1	Espessura da apara sem corte
T	Tempo de vida da ferramenta
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
ton.	Tonelada
UA	Universidade de Aveiro
VB	Desgaste de flanco (Desgaste da face de ataque)
VBmáx	Desgaste de flanco máximo
Vc	Velocidade de corte
VN	Extremidade da aresta de corte/entalhe
w	Largura de corte

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

W/m °C	Watts por metro Celcius
γ	Ângulo de ataque da ferramenta
α	Ângulo de saída
r_ϵ	Raio de curvatura da ponta
λ_s	Ângulo de inclinação
σ_x	Tensão residual na direção axial
σ_y	Tensão residual na direção circunferencial
χ	Ângulo de posição da ferramenta
°C	Grau Celcius
ϕ	Ângulo de corte
%	Porcentagem
μm	Micrometro

1 Introdução

1.1 Generalidades

Fabricar consiste basicamente em alterar matéria-prima com o intuito de obter um produto acabado. Os processos de fabrico representam, nos países industrializados, aproximadamente um terço do produto interno bruto (PIB) (*Kalpakjian, 1985*).

Atualmente, o aumento da produção industrial e da competitividade do mercado fazem as empresas pesquisar novas tecnologias no aperfeiçoamento contínuo dos processos de fabrico. Consequentemente, os produtos tornam-se a cada dia mais aperfeiçoados, qualificados e seus preços mais competitivos e acessíveis para atender as necessidades e exigências de clientes e consumidores (*Huang, 2007*).

De acordo com *Trent (1991)*, as operações de maquinagem representam o processo mais versátil e mais comum de manufatura que permitem a obtenção de geometrias complexas e/ou esbeltas com elevada precisão numa gama alargada de materiais e é, reconhecidamente, o processo de fabrico muito popular, empregando inúmeras pessoas em todo o mundo. No entanto, apesar da sua importância económica e tecnológica, os processos de maquinagem continuam a ser dos menos compreendidos, possivelmente devido à dificuldades na compreensão do mecanismo de formação de aparas e da maquinagem de materiais.

A maquinagem do aço inoxidável austenítico é geralmente complicada devido a propriedades específicas, como a alta taxa de deformação, por causa da formação de aparas longas e pela baixa condutividade térmica, o que leva à má condução do calor gerado durante a maquinagem (*M'Saoubi et al., 1999*). Além disso, a variação da composição química dos diferentes aços inoxidáveis austeníticos leva a diferenças nas suas propriedades. Estas variações nas suas propriedades têm uma influência sobre a maquinabilidade (*Ibrahim Ciftci, 2006*).

O estudo da maquinagem do aço inoxidável AISI 316 ganhou mais atenção devido a essa sua dificuldade de maquinagem, a fim de determinar as condições de corte ótimas e assim reduzir os custos de maquinagem das mesmas. Na Figura 1.1, apresenta-se os números de artigos científicos publicados que envolvem estudos de maquinagem do aço inoxidável AISI 316 na última década (2002 à 2013). Como se verifica, o interesse pelo estudo da maquinagem

do aço inoxidável AISI 316 teve um forte aumento nos últimos quatro anos. É de notar que, apesar do presente ano ainda não ter terminado, já se encontram bastante números de artigos científicos publicados nesta matéria.

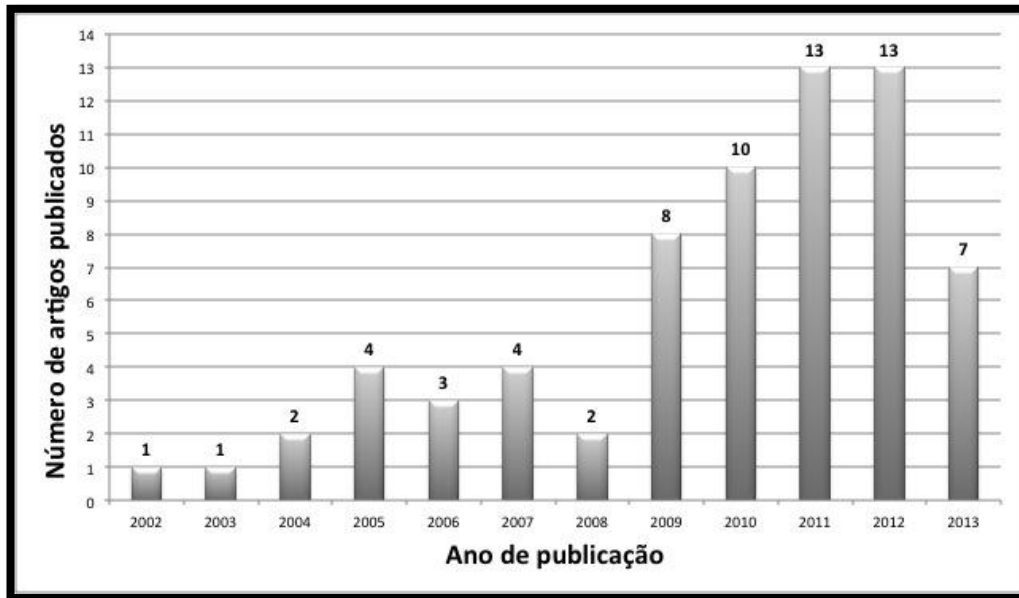


Figura 1.1 - Quantidade de artigos científicos publicados entre 2002 e 2013, com estudos efetuados na área da maquinagem do aço inoxidável AISI 316¹.

1.2 Objetivos do trabalho

O estudo de materiais para utilização em processos de maquinagem é expresso por uma característica chamada maquinabilidade. Esta característica expressa a facilidade ou a dificuldade de maquinar um material de acordo com um determinado critério. Apesar de não ser uma propriedade inerente ao material, a maquinabilidade é uma grandeza que qualifica o material a ser maquinado de acordo com um critério, que reflete os interesses do utilizador. Os critérios de maquinabilidade mais usados são o tempo de vida da ferramenta, as forças e potência de corte necessárias na maquinagem e a rugosidade das peças produzidas (*Ferraresi, 1970; Stemmer, 1985*).

Devido ao grande número de variáveis possíveis que podem ser relacionadas com a maquinabilidade de um material, torna-se necessário o pleno conhecimento destas, pois um material que apresenta melhor maquinabilidade em relação a um determinado critério pode apresentar pior maquinabilidade quando relacionado com um outro critério.

¹ <http://www.scopus.com/home.url>

Palavras-chave: *machining 316 stainless steel*

Data: maio de 2013

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Neste contexto se insere este trabalho, cujo objetivo principal é avaliar a maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 levando em consideração:

- o desgaste da ferramenta;
- a forma da apara obtida;
- o acabamento da superfície;
- a precisão dimensional da peça obtida.

O procedimento experimental adotado foi a realização de ensaios de corte curtos e longos, em torneamento cilíndrico exterior, em provetes de aço inoxidável AISI 316, com condições de corte pré-definidas, utilizando dois tipos de ferramentas de corte: ferramentas de carbonetos sinterizado (M25) com revestimento de tripla camada de TiCN/Al₂O₃/TiC com espessura de revestimento de 5,5 µm e com quebra-apara e ferramentas de carbonetos sinterizado (P25) sem revestimento e com quebra-apara. O revestimento de ferramentas ganhou uma enorme importância, pois tal revestimento pode garantir um desempenho bem superior à ferramenta sem revestimento, visto que melhora a resistência ao desgaste e consequentemente aumenta a vida da ferramenta de corte na maquinagem de aços inoxidáveis AISI 316. A espessura de revestimento pode variar entre 4 e 12 µm. Camadas muito espessas podem fragilizar a aresta, portanto, um número excessivo de camadas pode ter esse efeito nocivo. Quando se utilizam várias camadas finas intercaladas entre si, a resistência da aresta é consideravelmente maior se comparada com uma camada única de mesma espessura.

Pretende-se com este trabalho avaliar o desempenho de ferramenta de carboneto sinterizado (M25) com revestimento de tripla camada de TiCN/Al₂O₃/TiC, comparada com ferramenta de carboneto sinterizado (P25) sem revestimento, no torneamento a seco/com fluido de corte do aço inoxidável AISI 316. Pretende-se ainda, obter curvas de vida de ferramentas utilizando o modelo de Taylor para estes dois tipos de ferramentas de corte.

Os ensaios de corte curtos foram realizados em dois regimes diferentes: a seco e com uso de fluido de corte.

No decorrer desses ensaios de corte foram efetuadas medições de parâmetros da rugosidade, de desgaste e vida das ferramentas de corte e foi caracterizada a forma de aparas obtidas.

1.3 Organização do trabalho

O desenvolvimento da presente dissertação é composto por cinco capítulos e está realizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No **Capítulo 1, “Introdução”**, é feita uma breve introdução e apresentação do trabalho efetuado;
- No **Capítulo 2, “Revisão bibliográfica - Maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316”**, encontram-se descritos alguns resultados experimentais de estudos realizados por diversos investigadores na maquinagem do aço inoxidável AISI 316.
- No **Capítulo 3, “Metodologia experimental”**, faz-se a apresentação e caracterização do material em estudo, das ferramentas utilizadas e dos equipamentos utilizados. É apresentado o procedimento experimental e as condições dos ensaios efetuados.
- No **Capítulo 4, “Análise e discussão de resultados”**, são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos. Este capítulo está dividido em duas secções, de acordo com os objetivos propostos considerados:
 - Análise de maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 (ensaios de corte curtos)
 - Análise de maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 (ensaios de corte longos)
- No **Capítulo 5, “Considerações Finais”**, apresentam-se as conclusões gerais deste trabalho e enumeram-se possíveis trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica - Maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316

2.1 Introdução

Os aços inoxidáveis AISI 316, AISI 316L, AISI 316F, AISI 316N, AISI 316LN, AISI 316H e AISI 316Ti fazem parte da família do aço inoxidável AISI 316, e diferenciam-se entre si de acordo com a percentagem de elementos da liga presentes em cada um. Por exemplo, o aço inoxidável AISI 316L é o grau de baixo teor de Carbono do aço inoxidável AISI 316 e é imune à corrosão intergranular. Este fato torna-o adequado para ser usado em componentes soldados²

2.1.1 Composição química

Na Tabela 2.1 pode ser observada a composição química dos aços inoxidáveis da família do AISI 316.

O AISI 316 pode conter no máximo cerca de 0.08% de Carbono enquanto o aço inoxidável AISI 316L pode conter no máximo 0.03% de Carbono.

Tabela 2.1 - Composição química aços inoxidáveis da família do AISI 316 (% em peso) (Swill)³

AISI	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Outros
316	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 18,00	10,00 14,00	2,00 3,00	
316L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 18,00	10,00 14,00	2,00 3,00	
316F	0,08	2,00	1,00	0,20	0,10 min.	16,00 18,00	10,00 14,00	1,75 2,50	
316N	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 18,00	10,00 14,00	2,00 3,00	N: 0,10 a 0,16
316LN	0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 18,00	11,50 14,50	2,50 3,00	N: 0,10 a 0,30
316H	0,08	2,00	0,10 min.	0,045	0,030	16,00 18,00	9,00 12,50	2,00 3,00	
316Ti	0,08	2,00	0,75 máx.	0,045	0,030	16,00 18,00	10,00 14,00	2,00 3,00	Ti=5x %(C+N)

²http://www.efunda.com/Materials/alloys/stainless_steels/list_stainless.cfm?m=ais&Page_Title=AISI%20Type%203xx&ID_Low=AISI_Type_3

³ <http://www.teknikgroup.com/3.htm>
<http://sbecpl.com/products/stainless-steel/ss-316-316l/>

2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas

Um material é normalmente selecionado em função das suas propriedades e da aplicação a que se destina. Por isso, as propriedades mecânicas dos materiais são fundamentais. Em geral, as propriedades mecânicas do material que mais afetam a maquinabilidade são a dureza e a resistência mecânica do material (*El-Sonbaty et al., 2004*).

Na Tabela 2.2 apresenta-se as propriedades físicas e mecânicas do aço inoxidável AISI 316.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas e físicas do aço inoxidável AISI 316⁴

Propriedades mecânicas e físicas		AISI 316
Estrutura		Austenítica
Estado		Recozido
Densidade [g/cm ³]		8,0
Calor específico [J/kg K]		500
Coeficiente médio de expansão térmica [mm/mm °C]		1,99x10 ⁻⁸
Condutividade térmica [W/m K]	à 100 °C	16,2
	à 500 °C	21,5
Módulo de elasticidade [GPa]		193
Coeficiente de Poisson		0,27 – 0,3
Resistência à tração [MPa] min.		515
Tensão de cedência à 0,2% [MPa]	Min.	205
	Máx.	240
Extensão em 50 mm (%)		40
Dureza: Rockwell [B]; Brinell [HB]		95; 217

2.1.3 Tratamentos térmicos nos aços inoxidáveis AISI 316

O tratamento térmico de um metal ou liga é um procedimento tecnológico que consiste no aquecimento controlado, conduzido com o objetivo de modificar a microestrutura do metal ou liga, melhorando as suas características mecânicas, sem alterar a sua composição química (*Soares, P., 1992*).

Os aços inoxidáveis são muitas vezes tratados termicamente. A natureza do tratamento depende do tipo, do grau do aço inoxidável, assim como da razão para o tratamento. Estes tratamentos incluem: o recozido, o endurecimento, o alívio de tensões, o restabelecimento das propriedades desejáveis ao aço, tais como, a resistência à corrosão e a

⁴ http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html
<http://www.horainox.pt/especificacoes.aspx>

ductilidade, alteradas pelas operações de fabrico ou, produção de estruturas duras, capazes de resistir a elevadas tensões ou abrasão em serviço.⁵

Os aços inoxidáveis AISI 316 são já fornecidos no estado hipertemperado (*Soares, P., 1992*). A hipertêmpera consiste no aquecimento até à temperatura de 1000 a 1500 °C, conforme a qualidade do aço, depois um estágio a essa temperatura e posteriormente um arrefecimento, normalmente em água, ou no caso de pequenas espessuras (inferiores a 2 mm) no ar. A passagem pela zona de 600-450 °C deve ser rápida para evitar a corrosão intergranular. O tempo de estágio à temperatura de hipertêmpera deve ser apenas o suficiente para que o núcleo atinja aquela temperatura. Normalmente utiliza-se para o tempo de estágio 3 minutos. O aquecimento e o estágio a aquela temperatura têm por fim a dissolução dos carbonetos de Crómio e um relaxamento das tensões (*Soares, P., 1992*).

Dos tratamentos térmicos existentes, os que podem ser aplicados aos aços inoxidáveis AISI 316 são: o recozido; a solubilização; o alívio de tensões; a estabilização; e os tratamentos termoquímicos (onde se inclui a nitruração)⁶

O aço inoxidável AISI 316, sendo um aço inoxidável austenítico, não pode ser endurecido por tratamentos térmicos, mas pode ser endurecido rapidamente por trabalho a frio.

De entre os tratamentos térmicos e termoquímicos usados em aços inoxidáveis austeníticos, mais concretamente no aço inoxidável AISI 316, destacam-se o recozido, que pode ser feito por arrefecimento rápido após o aquecimento a 1010-1120 °C e a nitruração plasma. A nitruração plasma é um processo que consiste na geração de uma descarga elétrica de uma mistura gasosa que contém nitrogénio sob baixa pressão. É usada, aplicando, muitas vezes a técnica Nitruração Plasma por Tela Ativa (*ASPN - Active Screen Plasma Nitriding*).

2.1.4 Campo de aplicações

A tendência do uso do aço inoxidável está a aumentar atualmente em grande escala, graças a quatro fatores importantes: a aparência; a resistência à corrosão; a resistência a oxidação; e a resistência mecânica.

⁵ <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1141>

⁶ http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=79&cod_conteudo=108

Na seleção de materiais para aplicações de engenharia, especialmente em condições onde a corrosão é um problema, os aços inoxidáveis normalmente recebem maior preferência sobre outros metais devido à sua resistência à corrosão. O aço inoxidável AISI 316 é muito utilizado em peças que exigem alta resistência à corrosão localizada. É usado na indústria mecânica em geral e em particular nos equipamentos da indústria naval, petrolífera, química, farmacêutica, têxtil, papel e celulose, borracha, nylon e indústria de tintas⁷.

De seguida, apresentam-se algumas das várias aplicações específicas em que é usado o aço inoxidável da família do AISI 316: Equipamentos de processamentos de alimentos; Equipamento para indústria química e petroquímica; Bancadas dos laboratórios e equipamentos; Painéis arquitetónicos costeiros; Acessórios dos barcos; Recipiente para transportes de produtos químicos; Permutadores de calor; Porcas e parafusos; Molas; Aplicações de implantes médicos; Cubas de fermentação; Peças de válvulas; Evaporadores e agitadores; Equipamentos têxteis; Peças expostas à atmosfera marítima; Revestimento para fornos de calcinação⁸.

2.2 Maquinagem do aço inoxidável AISI 316

2.2.1 Parâmetros e ferramentas de corte

Uma maquinagem eficiente requer o acesso a dados relativos aos parâmetros e ferramentas a usar numa dada liga, cujas propriedades devem ser conhecidas, visto que influenciam nomeadamente as forças de corte, a potência de corte, a vida útil da ferramenta, a aplicação de fluido de corte e a escolha do material da ferramenta (*Matthew J., Donachie, 2000*).

Nesta secção é feita uma abordagem da influência dos parâmetros e das ferramentas de corte na maquinagem do aço inoxidável AISI 316, resultado das investigações levadas a cabo por muitos autores referenciados nesta dissertação.

⁷ http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html

⁸ http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html

2.2.1.1 Parâmetros de corte

Entre os parâmetros de corte, considera-se a velocidade de corte (V_c), normalmente expressa em [m/min], o avanço (a), expressa normalmente em [mm/rot.] e a profundidade de corte (p), que é expressa em [mm].

A partir destes parâmetros é possível determinar a taxa de remoção de material (equação 1), parâmetro usado para a medição da eficiência da operação, normalmente expressa em [cm³/min.] (Amorim J. H., 2002).

$$Q = V_c \times a \times p \quad (1)$$

Os valores de velocidade de corte recomendados na literatura (Sandvik, Dormer) para a maquinagem do aço inoxidável AISI 316 com ferramentas em carbonetos sinterizados vão desde 85 até aos 410 m/min. Os valores recomendados para o avanço residem na gama dos 0,05 até 0,6 mm/rot., e para a profundidade de corte variam de 0,1 até 4 mm.

Pela análise da Tabela 2.3 é possível constatar que alguns autores têm usado gamas de parâmetros de corte diferentes dos acima referidos, pois têm procurado encontrar novos parâmetros de corte afim de maximizar a vida da ferramenta de corte, aperfeiçoar os processos de maquinagem, eliminar os aspetos nocivos a maquinagem e com isso aumentar a produtividade.

2.2.1.2 Ferramentas de corte

Na maquinagem do aço inoxidável AISI 316, por se tratar de um material de difícil maquinagem, é comum o uso de ferramentas de corte de carbonetos sinterizados com ou sem revestimento e também aço-rápido com ou sem revestimento. Os revestimentos mais usuais são as vertentes com tripla camada de revestimento tais como: TiN/Al₂O₃/TiCN; TiC/ TiCN /TiN, TiC/Al₂O₃/TiN e TiCN/Al₂O₃/TiN. Por vezes usa-se revestimentos de quatro camadas, tais como TiN/TiCN/Al₂O₃/ZrCN e TiCN /Al₂O₃/ TiCN/TiN

As ferramentas de cerâmicos apesar das melhorias da qualidade e da sua crescente aplicação para a maquinagem de materiais difíceis de maquinar, não são recomendadas para a maquinagem do aço inoxidável AISI 316.

Relativamente ao carboneto sinterizado, a literatura (Sandvik, Dormer e Tabela 2.3) sugere o uso da classe M (M10, M20, M30 e M40), mas também tem-se usado algumas da

classe P para maquinagem do aço inoxidável de estrutura austenítica. De acordo com vários autores investigados no decorrer desta dissertação (Tabela 2.3), as ferramentas em carbonetos sinterizados, particularmente das classes M10, M30, P05, P25 e P45 têm sido as mais usadas para a maquinagem do aço inoxidável AISI 316.

No que toca às ferramentas de aço-rápido, as principais aplicações são em brocas, fresas inteiriças e até ferramentas de barra para aplicações de torneamento de peças de diâmetros reduzidos. Ao longo dos estudos analisados (Tabela 2.3) perante a presente dissertação, as ferramentas de aço-rápido usados na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 foram em operações de furação. Tem-se usado ferramentas de aço-rápido com ou sem revestimentos. Os revestimentos mais utilizados foram as de TiN, TiAlN e TiAlN/TiN.

2.2.2 Fluido de corte (lubrificação/Refrigeração)

Atualmente é praticamente impossível falar de lubrificação em operações de maquinagem sem englobar a vertente ecológica/questões ambientais.

Desde o início do século XX que os processos de produção começaram a ser desenvolvidos sistematizados cientificamente (*Sokovic., 2001*). A introdução de novos materiais, energia e novos processos de fabrico entraram em colapso com as questões ambientais por causa da produção de resíduos resultantes dos vários processos industriais. Este fenómeno foi crescendo e surgiram, na segunda metade do século XX, as organizações ambientais a alertar para a gravidade da situação. Com o aumento da contestação, gerou-se uma consciência global sobre a necessidade de controlar a emissão de poluentes. As várias ações desenvolvidas incidem na procura de novos métodos de fabrico, utilização de planos de racionalização energética e utilização de produtos biodegradáveis e recicláveis. Embora as medidas a tomar encontrem alguma resistência devido aos custos económicos da sua implantação, assiste-se já algumas soluções significativas (*Davim J. P., 2006*).

O diagrama da Figura 2.1 mostra as os métodos ecológicos de lubrificação/refrigeração nas operações de maquinagem.

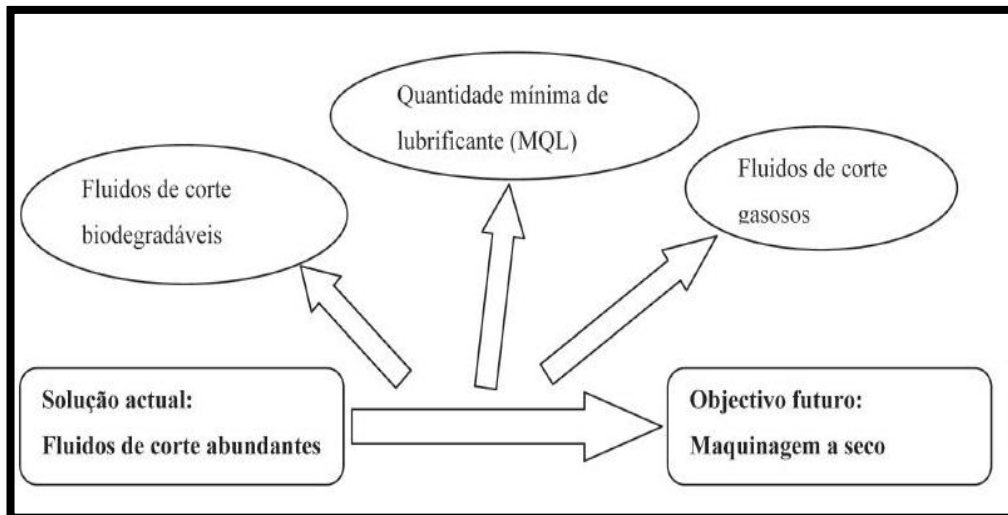


Figura 2.1 - Métodos ecológicos de lubrificação/refrigeração (Kelly et al., 2002).

Na maioria dos testes de investigação realizados com o aço inoxidável AISI 316 (Tabela 2.3), os autores efetuaram a maquinagem sem a utilização de qualquer fluido de corte, ou seja, foi feita uma maquinagem a seco. Mas houve alguns testes onde foram usados fluidos de corte tais como: dióxido de Carbono (CO_2); fluido refrigerante à base de óleo convencional; óleo vegetal biodegradável Accu-Lube LB 8000 e emulsão a 6% com base em óleo ARTESol Super EP.

Os fluidos de corte disponíveis no mercado para a maquinagem do aço inoxidável são basicamente os fluidos de corte sintético à base de água, como por exemplo o Aquatic, os fluidos de corte sintético, tais como: Quimatic1, Quimatic11, Quimatic1 Ecológico e Quimatic Jet e os fluidos de corte semi-sintéticos, solúvel, bio estável, do tipo EP (Extrema Pressão), isento de Cloro, nitritos e fenóis tais como: Savel 3100, Quakecool 7030, Quakecool 370, SuperEdge 6552 BF e Variocut B 30.

2.2.3 Condições de corte testadas

Na Tabela 2.3 são apresentados o tipo de corte, o material usado, os parâmetros de corte, o regime em que foi efetuado o corte e as ferramentas de corte testados por diversos autores, durante os ensaios de corte usando aços inoxidáveis da família do aço inoxidável AISI 316, mais concretamente os aços inoxidáveis AISI 316 e AISI 316L.

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Tabela 2.3 - Parâmetros e as ferramentas de corte testados por diversos autores na maquinagem dos aços inoxidáveis AISI 316 e AISI 316L.

Autores	Tipo de corte/ Material	Fluido de corte	Vc [m/min]	a [mm/rot]	p [mm]	Ferramenta
(Çiçek et al., 2012a)	Furação/AISI 316	Seco	12 14	0,08 1,00	13	Broca de aço-rápido sem revestimento (M35)
(Ranganathan S. et al., 2010)	Torneamento/ AISI 316	Seco	29,68 73,04 113,10	0,25 0,376 0,381	0,4 0,8 1,0	Carboneto de tungstênio: DCMT 3152 MF
(Maranhão et Davim J. P., 2010)	Torneamento/ AISI 316	Seco	100	0,05 0,10 0,20	1,0	Carboneto sinterizado revestido com tripla camada TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN
(D. B. Jerold et M.P. Kumar, 2012)	Torneamento/ AISI 316	Seco Lubrificado ^a CO ₂ ^b	41 94 145	0,051 0,096 0,143 0,191	1,0	Carboneto sinterizado revestido em PVD (CNMG 120404 MP 431 KC 5010)
(Ibrahim Ciftci, 2006)	Torneamento/ AISI 316	Seco	120 150 180 210	0,16	1,0	Carboneto sinterizado revestido em CVD com tripla camada TiC/TiCN/TiN (ISO P25-P45) Carboneto sinterizado revestido em CVD com tripla camada TiCN/TiC/Al ₂ O ₃
(Çiçek et al., 2012b)	Furação/ AISI 316	Seco	12 14 16 18	0,08 1,00 1,12	13	Broca de aço rápido sem revestimento (M35)
(Ranganathan S. et Senthilvelan T., 2010)	Torneamento/ AISI 316	Seco	29,68 73,04 113,10	0,25 0,376 0,381	0,4 0,8 1,0	Carboneto de tungstênio: DCMT 3152 MF
(Soreng A., 2011)	Torneamento/ AISI 316	Seco	100 150 200	0,20	1,0	Carboneto sinterizado revestido com quatro camadas TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /ZrCN (P30)
(Turgay et al., 2012)	Furação/AISI 316	Seco	12 14 16 18	0,10 0,12	13	Broca de aço-rápido revestimento em PVD com TiN Broca de aço-rápido revestimento em PVD com nano TiAlN Broca de aço-rápido revestimento em PVD com TiAlN/TiN
(Sanjib Kumar Hansda, 2011)	Torneamento/ AISI 316	Seco	100 150 200	0,20	1,0	Carboneto sinterizado sem revestimento (ISO P30)
(Outeiro et al., 2008)	Torneamento/AISI 316L	Seco	125	0,05	2,5	Carboneto sinterizado sem revestimento

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

(Outeiro et al., 2006b)	Torneamento/AISI 316L	Seco	100 200	0,05*	2,5**	Carboneto de tungstênio sem revestimento (ISO M10-M30) Carboneto de tungstênio revestido em CVD com tripla camada TiN/Al ₂ O ₃ /TiCN (ISO P05-P25)
(Wiklund U. et al., 2011)	Torneamento/AISI 316L	Seco	150	0,15	3,0**	Carboneto sinterizado com revestimento (WC+CO) de TiN depositados utilizando a evaporação de arco reativa.
(M'Saoubi et al., 2011)	Torneamento/AISI 316L	Seco	180	0,2	2,0**	Carboneto sinterizado revestido em CVD com tripla camada TiN/Al ₂ O ₃ /TiCN (ISO P05-P25). Aço Carbono (ISO P25)
(Outeiro et al., 2002)	Torneamento/AISI 316L	Seco	50 - 125	0,1 - 0,4	0,5 - 2,0	Carboneto de tungstênio sem revestimento (ISO M10-M30)
(Muñoz-Sánchez et al., 2011)	Torneamento/AISI 316L	Seco	120	0,1	2,0	Carboneto sinterizado sem revestimento
(Outeiro et al., 2006a)	Torneamento/AISI 316L	Seco	125 175 250	0,05 0,10 0,20	1,0 2,0 2,5	Carboneto de tungstênio sem revestimento (ISO M10-M30/ K05-K15). Carboneto de tungstênio revestido em CVD com tripla camada TiC/TiCN/TiN (ISO P25-P45)
(M'Saoubi et al., 1999)	Torneamento/AISI 316L	Seco	75-200 75-200 75-400 75-280	0,3 0,3 0,3 0,3	4,0** 4,0** 4,0** 6,0**	Carboneto sinterizado sem revestimento (ISO K05-K15/ K10-K15) Carboneto de tungstênio revestido em CVD com tripla camada TiC/Al ₂ O ₃ /TiN (ISO P05-P25) Carboneto de tungstênio revestido em CVD com tripla camada TiC/TiCN/TiN (ISO P25-P45)
(Umbrello et al., 2007)	Torneamento/AISI 316L	Seco	100 – 200	0,1- 0,2*	6,0**	Carboneto sinterizado sem revestimento (ISO M10 – M30)
(M'Saoubi et al., 2007)	Torneamento/AISI 316L	Seco	125 150 300 400 600	0,1 0,25 0,3	-----	Carboneto sinterizado sem revestimento (ISO M10-M30) Carboneto de tungstênio revestido em CVD com tripla camada TiC/TiCN/TiN (ISO P25-P45). Carboneto de tungstênio revestido em CVD com tripla camada TiC/Al ₂ O ₃ /TiN (ISO P05-P25)
(Leppert et Peng, 2012)	Torneamento/AISI 316L	Seco MQL ^c Emulsão ^d	82 164 255	0,08 0,27 0,47	0,5 1,0	Carboneto revestido em PVD com TiAlN

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

(Kalhori et al., 2010)	Torneamento/AISI 316L	Seco	100	0,25	3,0	Carboneto de tungstênio revestido em CVD com tripla camada TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN
			180	0,15	3,0	
			240	0,15	3,0	
			300	0,25	3,0	
			115	0,06	0,2	
(Nikolaos I. G. et Dimitrios E. M., 2009)	Torneamento/AISI 316L	Seco	307	0,06	0,2	Carboneto revestido com quatro camadas TiCN/Al ₂ O ₃ /TiCN/TiN.
			395	0,06	0,2	
			439	0,06	0,2	
			484	0,06	0,2	
			115	0,06	0,1	
			307	0,06	0,1	
			395	0,06	0,1	
			439	0,06	0,1	
			484	0,06	0,1	
			115	0,08	0,1	
			307	0,08	0,1	
			395	0,08	0,1	
			439	0,08	0,1	
484	0,08	0,1				

* - Foi usado outro parâmetro, nomeadamente a espessura da apara sem corte (t_1)

** - Foi usado outro parâmetro, nomeadamente a largura de corte (w).

a - Foi usado fluido refrigerante convencional à base de óleo

b - Foi usado o dióxido de Carbono (CO₂) como fluido refrigerante.

c - Foi usado um óleo vegetal biodegradável Accu-Lube LB 8000 com uma viscosidade cinemática de 37 mm²/s à 40 °C e um fluxo de 50 ml/h

d - Foi usado uma emulsão a 6% com base em óleo ARTESol Super EP, com um fluxo de 4 l/min.

2.3 Maquinabilidade

Maquinabilidade de um material é definida como sendo, a maior ou menor facilidade com que o material pode ser maquinado por arranque de apra e pode ser avaliado convencionalmente em função de quatro critérios (Kalpak et Schmid, 2002): Acabamento e integridade de superfície da peça; Desgaste da ferramenta; Controlo da apra obtida e forças e potência de corte.

Uma boa maquinabilidade traduz-se num bom acabamento de superfície, em baixa força e potência de corte e também baixo desgaste da ferramenta de corte. Não existe ainda hoje uma definição satisfatória e muito menos um processo incontroverso de avaliação da maquinabilidade, apesar de mais de um século de investigação (Davim J. P., 2006).

A maquinabilidade pode ser classificada através do índice de maquinabilidade, que tem como padrão o aço AISI B-1112, considerado um aço de corte fácil, com índice de 100% (Figura 6.1, em anexo).

Na Figura 2.2 representa-se um esquema dos principais parâmetros que influenciam a maquinabilidade.

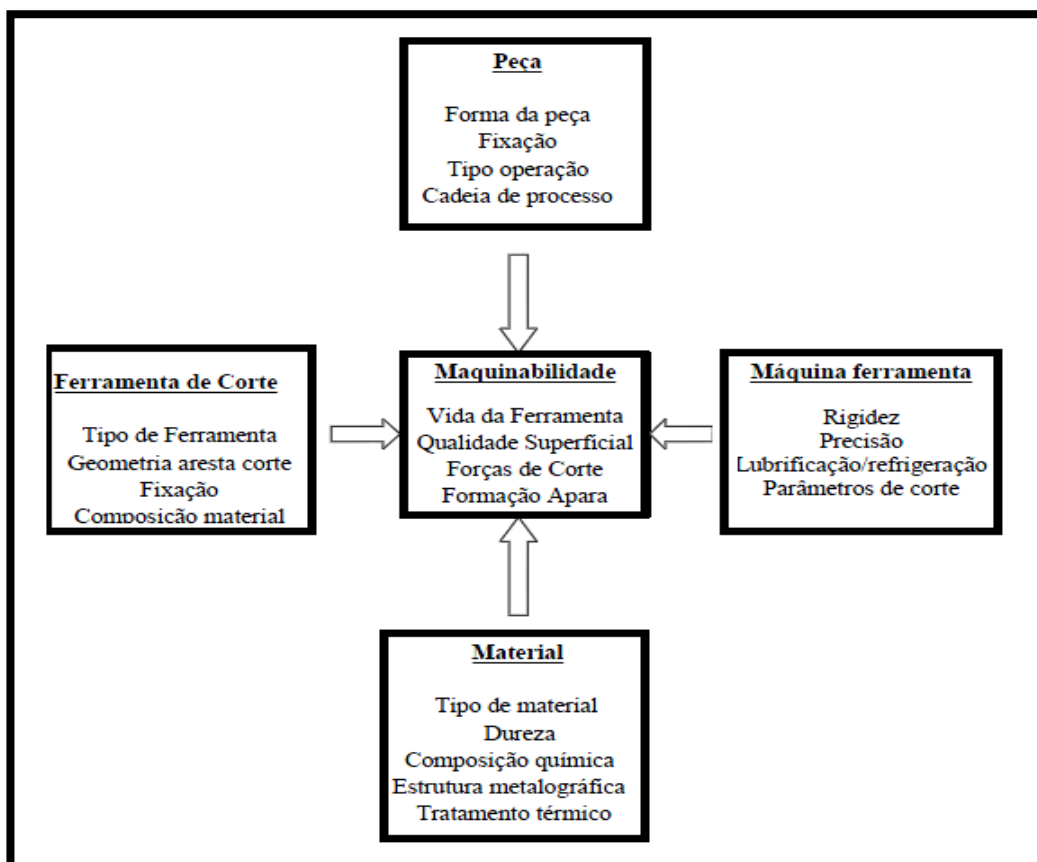


Figura 2.2 - Principais parâmetros que influenciam a maquinabilidade.

A maquinabilidade de aços inoxidáveis é muitas vezes comparada opondo a resistência equivalente ao valor que representa o conteúdo de liga do aço. É quantificado através do índice de corrosão resistência equivalente (*PRE – Pitting Resistance Equivalente*). O *PRE* é obtido através da equação 2 (*Cvijovic et Radenkovic, 2006*) e varia de 22,60 a 27,90 para o aço inoxidável AISI 316.

$$PRE = [\%Cr] + 3,3 [\%Mo] + 16 [\%N] \quad (2)$$

sendo Cr o cromo, o Mo o molibdênio e N o nitrogênio.

É de referir que quanto maior for o *PRE* para uma liga, melhor é a sua resistência à corrosão.

Em muitos casos, os problemas de maquinagem com aços inoxidáveis austeníticos estão associados com a formação de aresta postiça de corte, reduzida qualidade de superfície, formação de rebarbas e forma de aparas desfavorável. A maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 tem sido problemática, por vários motivos. Um dos motivos é o fato de que endurece durante a deformação e os valores da dureza próximo da superfície maquinada podem aumentar em até 100% do valor da dureza inicial. Outros dos motivos é o facto de os aços inoxidáveis AISI 316 possuírem uma baixa condutividade térmica, alta sensibilidade à taxa de deformação. A sua baixa condutividade térmica leva a concentração de calor na zona de corte, resultando em altas temperaturas localizadas. Como resultado, a maquinagem de tais aços induz tensões residuais relativamente elevadas na camada superficial e, portanto, afeta fortemente as propriedades desses aços e a sua capacidade de resistir a severas condições de carga (*Outeiro et al.,2006*). Também a elevada tenacidade tem sido um dos entraves a maquinagem do aço inoxidável.

2.3.1 Aparas e mecanismo de formação

No processo de corte de metais, o material indesejado é removido da peça em forma de aparas ao produzir-se peças acabadas de dimensões e precisão exigidas.

O processo está representado na Figura 2.3, onde a ferramenta de corte possui uma geometria bem definida. O caso geral do corte por arranque da aparas é ilustrado na Figura 2.3a) onde a ferramenta possui uma determinada obliquidade em relação ao movimento sobre a peça a maquinar, denominado por corte oblíquo. A Figura 2.3b) representa um caso especial

do processo, onde a superfície da face de ataque da ferramenta de corte é perpendicular à direção de corte e é denominado por corte ortogonal (Merchant, 1944).

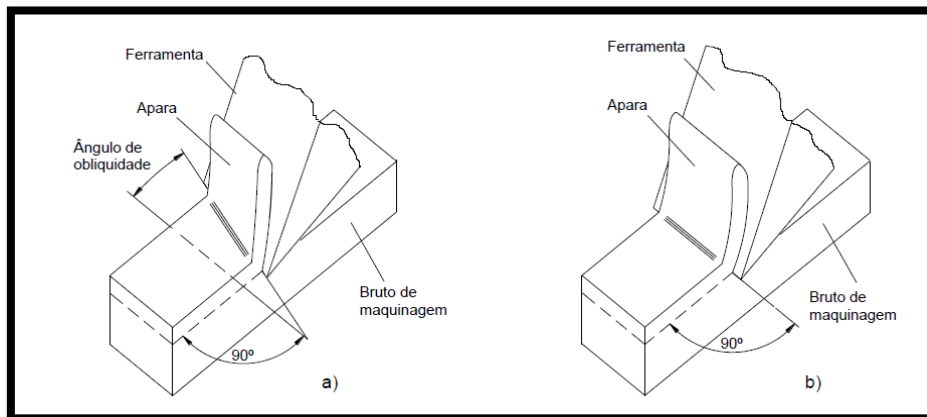


Figura 2.3 - Representação esquemática do corte por arranque de avara; a) Corte Oblíquo; b) Corte Ortogonal (Merchant, 1944).

Com a utilização do conceito de corte ortogonal introduziram-se vários postulados simplificativos, permitindo assim, estudar o mecanismo de corte por arranque de avara em apenas duas dimensões (Mesquita et al., 1990). No entanto, após a introdução destas simplificações é possível eliminar muitas variáveis, diminuindo-se assim o grau de complexidade para se estudar este processo.

Uma das mais importantes variáveis neste processo é a inclinação da face de ataque. Esta inclinação designa-se *ângulo de ataque* da ferramenta de corte (γ) e de acordo com a terminologia ISO o seu sinal é definido conforme mostrado na Figura 2.4 (Cangundo M. E., 2009). Apesar da face de saída não entrar diretamente no processo de formação da avara, tem sido objeto de estudo quando se pretende otimizar e/ou minimizar o tempo de vida das ferramentas de corte. Esta é definida pelo *ângulo de saída* (α), entre a superfície de saída e uma linha paralela à nova superfície da peça. Uma outra variável com grande importância é o *ângulo de corte* (ϕ) que apesar das dificuldades existentes em se determinar experimentalmente, é possível obtê-lo de forma analítica com base no *grau de recalque* (R_C):

$$R_C = \frac{e'}{e} = \frac{AB \cos(\phi - \gamma)}{AB \sin \phi} = \cot \phi \cos \phi + \sin \gamma \quad (3)$$

Com algumas manipulações matemáticas a partir da equação 3 é possível calcular o *ângulo de corte* (equação 4), com o *ângulo de ataque* da ferramenta (γ), a *espessura da avara antes do corte* (e) e *depois do corte* (e'), logo com o grau de recalque (R_C).

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left[\frac{\cos \gamma}{R_C - \sin \gamma} \right] \quad (4)$$

A Figura 2.4b mostra as zonas de corte consideradas nos processos de corte por arranque de aparas. A primeira zona, é denominada de zona primária de corte, que começa na aresta de corte e estende-se ao longo do plano de corte até atingir a superfície exterior do material, limitando a zona onde o material será deformado. Nesta região, o material atinge a tensão máxima de corte na direção do plano de corte e distorce ao longo deste plano. A segunda zona, é denominada de zona secundária de corte, e surge ao longo do plano de ataque da ferramenta como resultado do atrito de contacto entre esta e a superfície da aparas. Por último, a terceira zona, denominada zona terciária de corte, surge no decorrer do deslizamento entre a superfície recém-formada da peça e a face de saída da ferramenta de corte (Cangundo M. E.,2009).

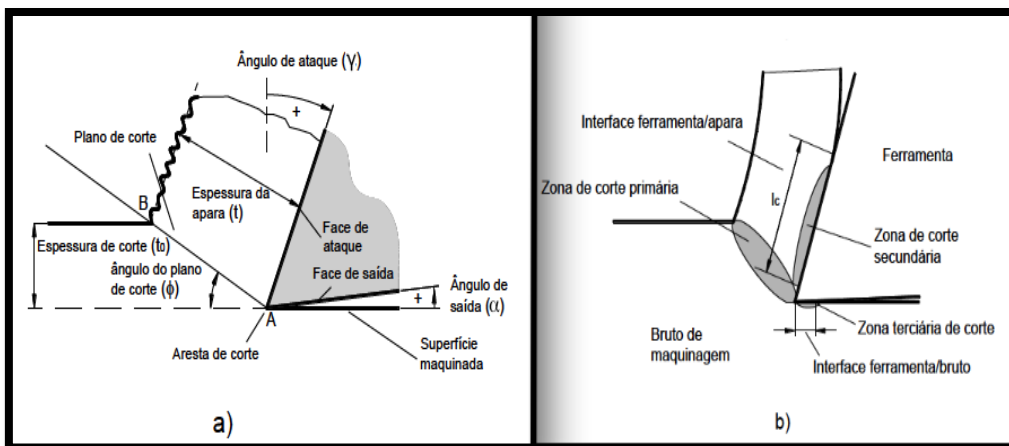


Figura 2.4 - Mecanismo de formação de aparas: a) Representação bidimensional do corte ortogonal, ilustrando os principais parâmetros; b) Zonas de corte (adaptado de Cangundo M. E.,2009).

Uma das características da maquinagem do aço inoxidável AISI 316 é a obtenção de aparas em dente serrilhado, resultado das instabilidades no processo de corte para uma certa gama de velocidades. A forma da aparas obtida é diferente da do tipo contínuo, que é característica da maquinagem da maioria dos aços sujeitos a condições de corte convencionais. O mecanismo de formação da aparas em dente serrilhado na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 é geralmente aceite como sendo o resultado de instabilidades termoplásticas na zona primária de deformação, fenómeno designado por mecanismo de deformação termoplástica.

Outeiro et al., (2006) obtiveram tanto para a análise experimental como para a simulação numérica aparas tipo dente serrilhado. Este resultado pode ser observado na Figura 2.5.

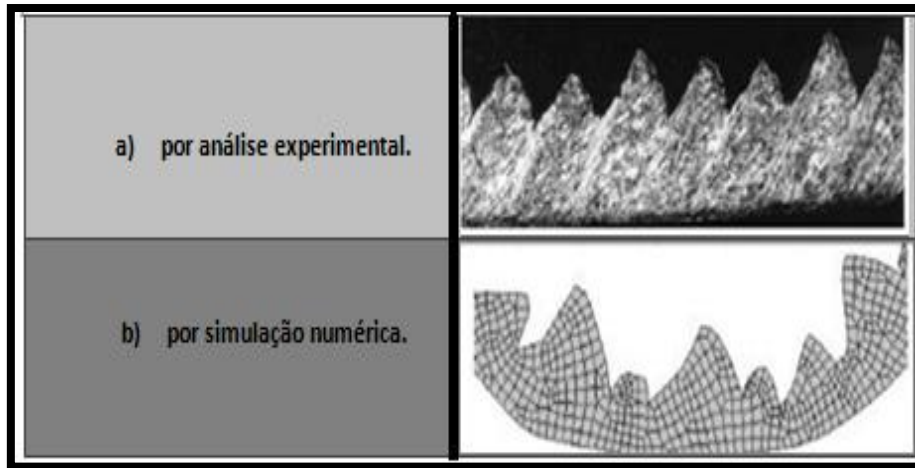


Figura 2.5 - Forma de apara obtida para o aço inoxidável AISI 316L a) por análise experimental; b) por simulação numérica (Outeiro et al., 2006).

O encruamento tem sido reconhecido como uma característica importante na baixa maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316. De acordo com *Jiang et al. (1996)*, o encruamento, em conjunto com baixa condutividade térmica, pode resultar na formação de aparas segmentadas.

Soreng A. (2011), efetuou experiência usando diferentes velocidades de corte, com avanço e profundidade de corte constantes e obteve diferentes espessuras de apara. Concluiu que o aumento da velocidade de corte provoca uma diminuição na espessura da apara. Os resultados referentes a esse estudo são dados a conhecer na Figura 2.6 e na Tabela 2.4

Velocidade de corte [m/min]	Imagem de microscópio Ótico	Morfologia da Apara
100		
150		
200		

Figura 2.6 - Imagens da apara obtida com diferentes velocidades de corte (Soreng A., 2011).

Tabela 2.4 - Morfologia das aparas (Soreng A., 2011).

Vc [m/min]	Tipo de apara	Espessura da apara após corte [mm]
100	Continua	0,435
150	Continua	0,353
200	Continua	0,325

Sanjib Kumar Hansda (2011), concluiu que a espessura da apara aumenta com o aumento do tempo de corte, mas diminui com o aumento da velocidade de corte.

Na maquinagem a seco e usando o óleo convencional como fluido de corte, foram obtidas aparas longas, grossas, tubulares e difíceis de quebrar, enquanto na maquinagem usando CO₂ como fluido de corte, foram obtidas aparas curtas, finas e tubulares (quando a velocidade de corte foi de 41 m/min.) (*B. D. Jerold e M. P. Kumar, 2012*).

2.3.2 Forças de corte

A força de corte pode ser um importante indicador da maquinabilidade, constituindo um parâmetro importante na tomada de decisões sobre o material a ser usado em determinada operação. É muito importante estudar a dinâmica das forças de corte em qualquer processo para um planeamento apropriado, controle do processo de maquinagem, e otimização das forças de corte para minimizar os custos e tempos de produção (*Zaman et al., 2006*).

M'Saoubi et al. (1999), defendem que a modelação de forças no corte de metais é importante para uma infinidade de propósitos, incluindo análise térmica, estimativa de vida útil da ferramenta e monitoramento da condição da ferramenta.

Os parâmetros de corte exercem alguma influência sobre as forças de corte. Em relação ao avanço e à profundidade de corte, um aumento desses parâmetros causa uma elevação na área do plano de corte levando a um aumento da força de corte e, conseqüentemente, da energia requerida para cortar o material, bem como o aumento da temperatura (*Abrão et al., 1996*).

Ibrahim Ciftci (2006), efetuou ensaios com dois tipos de revestimentos em ferramentas de corte, nomeadamente, TiC/TiCN/TiN e TiCN/TiC/Al₂O₃. Notou que a ferramenta de corte revestida com TiC/TiCN/TiN gerou valores menores de forças de corte do que a ferramenta de corte revestida com TiCN/TiC/Al₂O₃. Atribuiu esse fato ao baixo coeficiente de atrito sobre a

face de ataque presente no revestimento TiC/TiCN/TiN quando comparado com o revestimento TiCN/TiC/Al₂O₃. Devido ao menor coeficiente de atrito, é observado uma menor aderência do material da peça na face de ataque quando é efetuado o corte usando a ferramenta com revestimento de TiC/TiCN/TiN. Assim, o comprimento de contato na interface Ferramenta/apara diminui, por sua vez, reduz as forças de corte desenvolvidas.

O mesmo autor observou uma diminuição da força de corte, até um valor mínimo, para ambas as ferramentas de corte, com o aumento da velocidade de corte de 120 para 150 m/min. e depois, volta a aumentar.

Ao comparar as forças de corte obtidas para os dois materiais de testes estudados (aços inoxidáveis austeníticos AISI 316 e AISI 304), para diferentes velocidades de corte, Ibrahim Ciftci (2006), notou que as forças de corte geradas eram sempre maiores na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 do que no aço inoxidável AISI 304. Atribuiu essa diferença nas forças de corte a diferenças na composição química dos dois materiais. O aço inoxidável AISI 316 apresenta Molibdênio na sua composição química, o que melhora a sua resistência a altas temperaturas.

B. D. Jerold et M. P. Kumar (2012), observaram uma diminuição das forças de corte com o aumento da velocidade de corte. Esse aumento deve se ao fato de que o aumento da velocidade de corte provoca um aumento na temperatura de corte que, por sua vez, provoca uma diminuição na dureza superficial do material, o que torna necessário uma menor quantidade de forças para cortar o material. Ainda observou que a força de corte aumenta com o aumento do avanço.

2.3.3 Temperaturas de corte

A temperatura gerada durante o processo de maquinagem tem sido alvo de vários estudos nos últimos anos (Silva et Wallbank, 1999; M'Saoubi R. et Chandrasekaran, H., 2011; B. D. Jerold e M. P. Kumar, 2012). Tem havido avanços significativos em termos de novas técnicas, novos materiais e revestimentos de ferramentas de corte e, alterações de parâmetros de corte a fim de diminuir a temperatura gerada.

A distribuição da temperatura gerada durante o processo de corte é influenciada por vários fatores, tais como: o material da peça; o material da ferramenta; a geometria da ferramenta; os parâmetros de corte; o meio lubrificante/refrigerante, etc.

No que diz respeito à temperatura gerada durante a maquinagem do aço inoxidável AISI 316, *Outeiro et al. (2008)*, verificaram que a temperatura máxima está localizada próximo do raio de ponta da ferramenta e é cerca de 600°C.

M'Saoubi R. et Chandrasekaran H. (2011), notaram, na experiência, que a temperatura desenvolvida no corte era superior na maquinagem do aço AISI 316L-LS (baixo teor de enxofre) quando comparado ao aço AISI 316L-S-Ca (um aumento de aproximadamente 4,5%). Notaram também, para o caso do aço AISI 316L-S-Ca, uma diminuição de 30 °C na temperatura da ferramenta com o aumento do tempo de corte de 15 para 75 s. Os resultados de simulação indicam temperatura mais elevada para a variante de baixo teor de enxofre (AISI 316L-LS) quando comparado com o AISI 316L-S-Ca.

Comparando uma ferramenta não revestida com uma revestida, mostrou-se que o revestimento atua em duas formas. Na primeira, as melhores propriedades de atrito da camada externa de TiN levam a uma diminuição em forças de corte e, portanto, o nível de temperatura próximo da aresta de corte. Na segunda, a baixa condutividade térmica da ferramenta revestida fornece um efeito de barreira térmica que leva a uma maior fração do calor a ser levado na apara durante o corte (*M'Saoubi R., et al., 1998*).

B D. Jerold e M. P. Kumar (2012), efetuaram experiências em três regimes diferentes, nomeadamente usando o Dióxido de Carbono (CO₂) como lubrificação, usando o óleo de corte convencional como lubrificação e, por fim, a seco. Verificaram que a temperatura de corte aumenta com o aumento da velocidade de corte e do avanço de corte, em todos os regimes estudados. Ao comparar os diferentes regimes de maquinagem, notaram que na maquinagem com CO₂ conseguiu-se uma maior redução de temperatura de corte do que na maquinagem a seco e maquinagem com lubrificação. Entre a maquinagem com o CO₂ e a maquinagem a seco, a redução na temperatura foi de até 50% e entre a maquinagem com o CO₂ e a maquinagem lubrificada com óleo convencional a redução foi de até 35%.

2.3.4 Desgaste e vida das ferramentas de corte

Nesta secção é abordado o fenómeno de desgaste da ferramenta no processo de maquinagem do aço inoxidável AISI 316, que, geralmente é dependente do material e da geometria da ferramenta de corte, do material da peça de trabalho, dos parâmetros de corte (velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte), dos fluidos de corte e das características de máquina-ferramenta.

Usando os parâmetros de corte comuns na prática, as ferramentas de corte chegam ao final de sua vida útil por causa do desgaste contínuo e crescente em ambas as faces, de saída e de ataque (*Fritz Klocke, 2010*). Normalmente, o desgaste da ferramenta é um processo gradual. O desgaste de flanco (VB) e da cratera (KT), são as formas mais importantes de medição do desgaste da ferramenta, sendo o desgaste de flanco, o mais comumente usado para o monitoramento de desgaste. Na prática, podemos considerar à partida dois grupos de desgastes (*Ferraresi, 1989*): os que originam o colapso da ferramenta de uma forma mais ou menos abrupta, normalmente designadas por avarias; e os que conduzem à remoção gradual e progressiva de material de zonas localizadas na face de ataque ou na face de saída da ferramenta, normalmente designadas de desgaste.

Em geral, o desgaste dá-se em duas regiões adjacentes à aresta de corte: face de ataque e face de saída. Na maioria dos casos, o desgaste na face de saída ou de folga não é regular ao longo do comprimento da aresta, apresentando variações, geralmente com máximos na parte correspondente à extremidade da aresta de corte - entalhe - (VN), e junto ao raio de curvatura da ferramenta de corte – bico -, Figura 2.7.

O desgaste da face de saída é, geralmente, definido pelo valor médio (VB) ou máximo (VBmáx), enquanto o desgaste em cratera toma em consideração a profundidade da cratera (KT), a sua largura (KB) e a distância da aresta de corte principal ao eixo de corte da cratera (KM), como ilustrado na Figura 2.7.

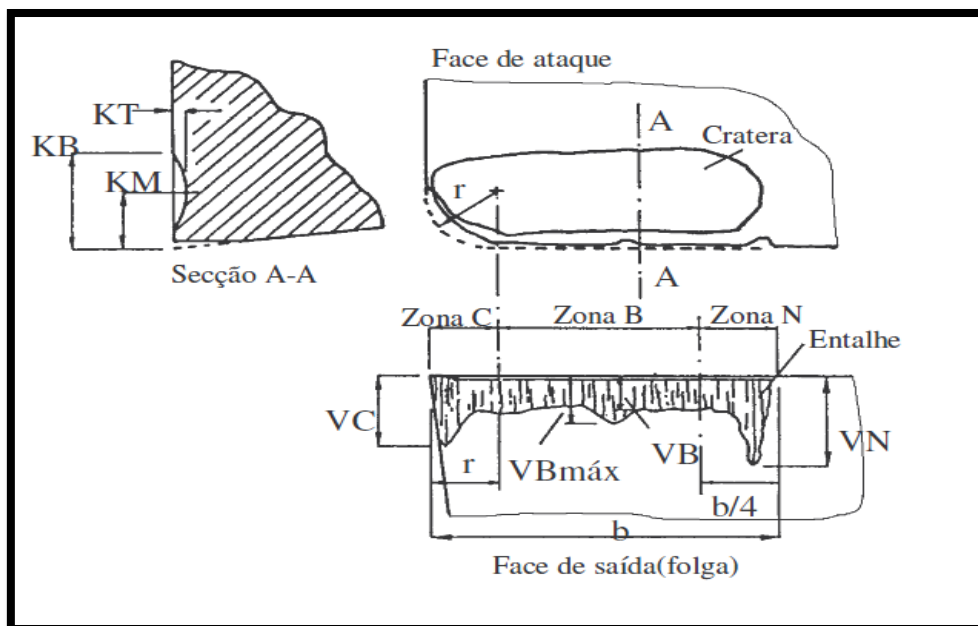


Figura 2.7 – Formas de desgaste típicas das ferramentas segundo a ISO 3685/1993.

A Figura 2.8 ilustra os tipos mais comuns de avarias e desgaste sofridas pelas ferramentas de corte durante as operações de maquinagem.

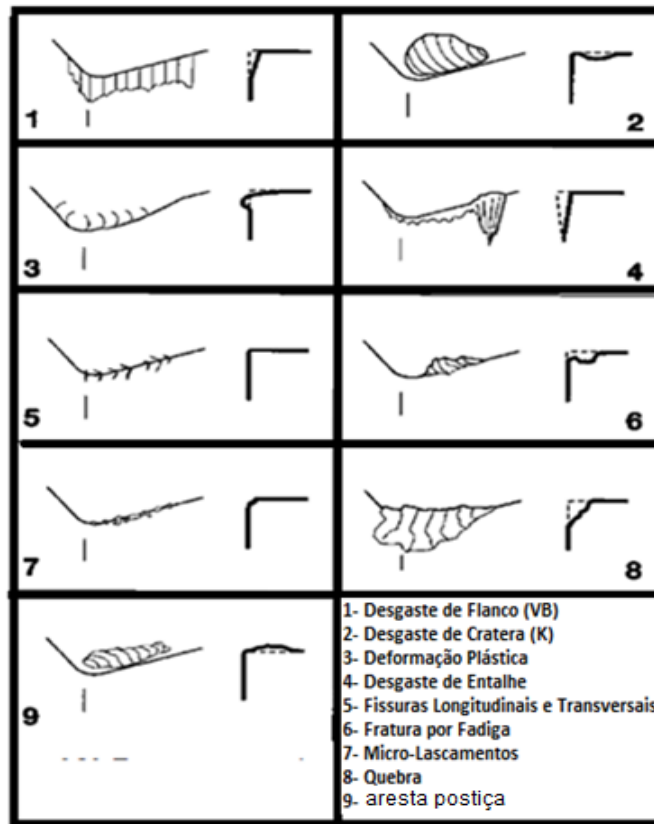


Figura 2.8 - Desgastes e avarias comuns nas ferramentas de corte (adaptado de *Astakhov et Davim J. P., 2008*).

Diversos fatores contribuem, simultaneamente, para o processo de desgaste da ferramenta. Segundo *Astakhov et Davim J.P., (2008)*, os principais fatores geradores de desgastes (Figura 2.9) são: a abrasão; a adesão; a aresta postiça de corte; a oxidação; a difusão, etc.

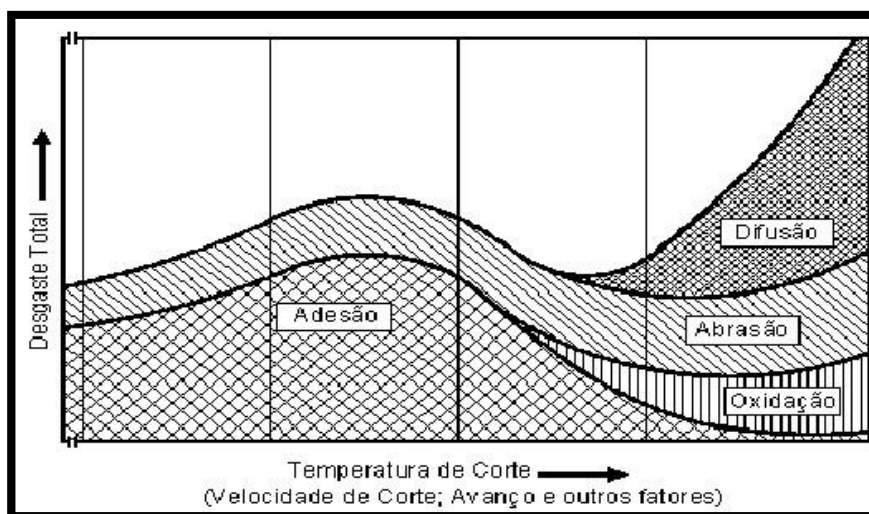


Figura 2.9 – Mecanismos de desgaste da ferramenta (König, W. et Klocke, F., 1997).

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

A vida útil da ferramenta é definida como o tempo de corte efetivo da(s) sua(s) aresta (s) em trabalho antes que seja necessário afiá-la ou substituí-la (Davim, J. P., 2006). O desgaste da ferramenta é quase sempre utilizado como um critério de tempo de vida, porque é fácil de determinar quantitativamente. A região de desgaste de flanco VB é frequentemente utilizado como critério devido à sua influência sobre a rugosidade da superfície da peça e da precisão dimensional.

Na Tabela 2.5 apresentam-se os valores limites de desgaste recomendáveis na prática, para diferentes materiais de ferramenta, em operações de desbaste e acabamento.

Tabela 2.5 - Valores limites de desgaste recomendáveis na prática, para diferentes materiais de ferramenta (Ferraresi, 1989).

Material da ferramenta		Aço-rápido	Carbonetos sinterizados	Carbonetos revestidos	Cerâmicos	
Operação	Desgaste [mm]				Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄
Desbaste	VB	0,35-1,0	0,35-0,5	0,3- 0,5	0,25-0,3	0,25-0,3
	VBmáx.	0,4- 1,4	0,5- 0,8	0,4-0,7	-	-
	KT	0,1- 0,3	0,1- 0,2	0,1- 0,15	0,1	0,1-0,15
Acabamento	VB	0,2- 0,3	0,1- 0,25	0,1-0,25	0,1-0,2	0,1- 0,2
	VBmáx.	-	-	-	-	-
	KT	-	-	-	-	-

A Figura 2.10 apresenta um gráfico da variação do desgaste da ferramenta em função do tempo de maquinagem e da velocidade de corte. A região #1 indica a fase em que a ferramenta entra em contato com o material da peça. A região #2 indica a fase onde ocorre grande parte do desgaste da ferramenta. A região #3 indica a fase onde a região de corte atinge altas temperaturas e o desgaste da ferramenta é bastante acentuado. Percebe-se também, através desta figura, que o emprego de uma velocidade de corte menor aumenta o tempo de vida da ferramenta (reduz a taxa de desgaste). Entretanto, esta opção reduz a produtividade da máquina-ferramenta.

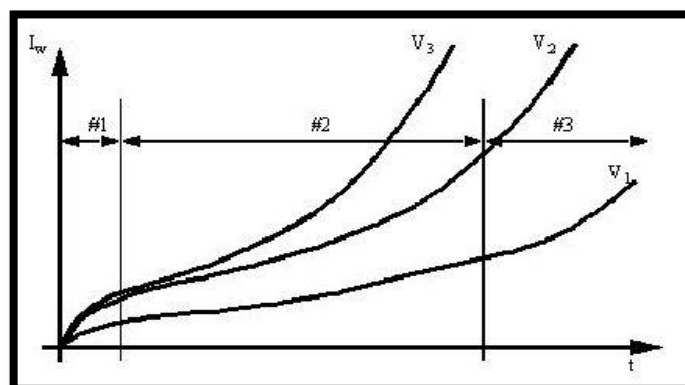


Figura 2.10 – Variação do Desgaste com a Velocidade de Corte ($V_3 > V_2 > V_1$) (König, W. et Klocke F., 1997).

Taylor apresentou a seguinte equação para a vida da ferramenta:

$$V_c T^n = C \quad (5)$$

Onde V_c é a velocidade de corte, em [m/min], T é a vida da ferramenta, em [min] para desenvolver um certo desgaste de flanco (VB), n é um expoente que depende dos parâmetros de corte e C é uma constante.

A Tabela 2.6 apresenta gama de valores de n determinados na prática, para alguns materiais da ferramenta de corte.

Tabela 2.6 - Os valores de n observados na prática de diversos materiais para ferramentas de corte (Astakhov e Davim J. P., 2008).

Material da ferramenta	Aço-rápido	Carbonetos sinterizados	Cerâmicos
n	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	0,5 – 0,7

Vários são os autores que efetuaram estudos sobre os efeitos dos parâmetros de corte no desgaste e na vida da ferramenta de corte, durante a maquinagem dos aços inoxidáveis austeníticos. Tekiner et al. (2004), estudaram, para o aço Inoxidável AISI 304, os valores do desgaste de flanco (VB) resultantes de cinco velocidades de corte diferentes (120, 135, 150, 165 e 180 m/min.) e três avanços diferentes (0,2; 0,25 e 0,3 mm/rot.) e notaram que o desgaste de flanco (VB) sofre uma diminuição quando o avanço aumenta de 0,20 para 0,25 mm/rot. e em seguida sofre um aumento quando o avanço aumenta para 0,3 mm/rot..

Astakhov (2006), mostrou que a vida útil da ferramenta diminui com o aumento do avanço. De acordo com Korkut et al., (2003) o desgaste da ferramenta cresce com o aumento da velocidade de corte até 180 m/min.

O aço inoxidável AISI 316 possui um conjunto de características responsáveis pela sua difícil maquinabilidade, que se traduzem num elevado grau de desgaste e avarias da ferramenta de corte. As ferramentas de corte na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 estão sujeitas a um choque severo térmico e mecânico, assim como a elevadas tensões de corte e elevadas temperaturas próximas da aresta de corte, que influenciam a taxa de desgaste e consequentemente a vida da ferramenta.

Sanjib Kumar Hansda (2011), concluiu que a velocidade de corte tem uma influência significativa sobre a progressão e/ou crescimento do desgaste de flanco (VB). Há um aumento do desgaste de flanco (VB) da ferramenta com o aumento da velocidade de corte. Também notaram que o aumento de tempo de corte provoca um aumento no desgaste da ferramenta.

Soreng A.(2011), notou que a velocidade de corte não afeta muito o desgaste na fase de ataque (KT), mas exerce uma forte influência no desgaste de flanco (VB). Quando a

velocidade de corte aumenta o desgaste de flanco (VB) também aumenta, e este aumento é mais predominante para a velocidade de corte de 200 m/min. Notou também um lascar da ponta da ferramenta. Atribuíram o lascar da ferramenta e o desgaste de flanco à tendência de encruamento e à baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis austeníticos.

Muñoz-Sanchez et al. (2011), analisaram vários tipos de desgaste na ferramenta de corte e concluíram que o desgaste conduz a um aumento da tensão residual quando foram comparados com a tensão residual obtida na ferramenta de referência (sem desgaste).

O revestimento de ferramenta melhora a resistência ao desgaste da ferramenta de corte, aumentando assim a vida útil da ferramenta.

2.3.5 Integridade superficial/precisão dimensional

A definição para o conjunto de alterações que ocorrem na superfície de peças, devido à ação de ferramentas de corte ou outros processos de fabrico, é denominado integridade de superfície. O fim último da maquinagem é produzir peças mecânicas, com superfícies funcionais, com precisão dimensional e geométrica adequada e, ainda, com o acabamento superficial requerido (*Davim J. P., 2005*).

Várias são as propostas para a avaliação destas condições de superfície e, além das avaliações dimensionais e das medições de desvios de forma e de posição das peças maquinadas, denominados desvios macrogeométricos, deve efetuar-se a medição dos desvios denominados microgeométricos, normalmente feita por meio de rugosímetros ou de perfilômetros. A medição microgeométrica mais usual é a da rugosidade, que é a medição das marcas, tais como ranhuras, sulcos, estrias e crateras. Estas, por sua vez, são resultado de marcas de ferramentas durante o avanço ou posicionamento da peça no processo de maquinagem. Existe também a formação de estrias ou rebarbas na maquinagem durante a retirada da apara.

Na maioria das aplicações requer-se uma alta qualidade nas superfícies maquinadas, incluindo precisão dimensional e integridade de superfície. Por esta razão, foram levados a cabo diversos estudos com o objetivo de otimizar os parâmetros de corte para se obter uma determinada rugosidade (*Abouelatta et Mádl, 2001*). Para se conseguir o acabamento de superfície desejado é necessário conhecer os mecanismos de corte, o comportamento do material e também a mecânica do processo de maquinagem que afeta o comportamento das ferramentas de corte.

A rugosimetria “clássica” com apalpador de ponta de diamante é a técnica de caracterização do acabamento superficial mais divulgada. Serve de suporte à aplicação dos critérios – parâmetros de rugosidade. A caracterização completa do acabamento superficial necessita de três grupos de critérios: de amplitude, de espaçamento e híbridos, segundo a norma **ISO/DIS 4287/1**.

Entre os critérios de amplitude, a *rugosidade média aritmética (Ra)*, a *amplitude máxima da rugosidade (Rt)* e a *profundidade média da rugosidade (Rz)* são os mais utilizados, sobretudo o *Ra*. Na maquinagem, os parâmetros *Ra* e *Rt* assumem especial importância por se poderem relacionar analiticamente com os parâmetros de corte, como pode ser visto na Figura 2.11 (Davim J. P., 2005).

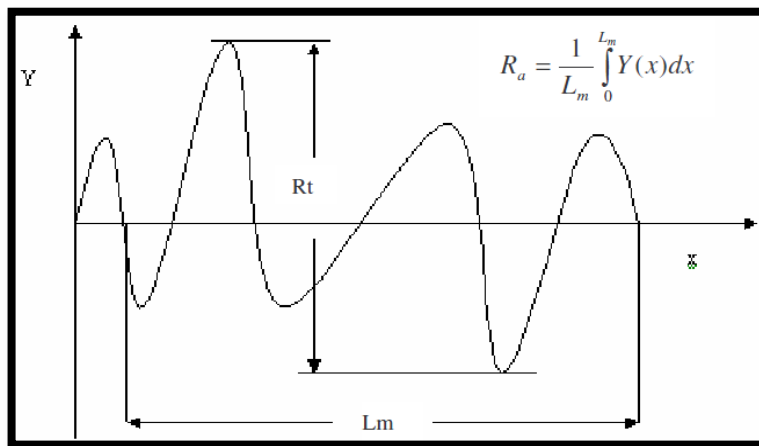


Figura 2.11 - Esquema da definição dos parâmetros *Ra* e *Rt* de acordo com a norma **ISO/DIS 4287/1**.

Segundo Davim J. P. (2005), o acabamento de superfície obtido por torneamento pode ser conseguido utilizando ferramentas com duas arestas de corte interligadas pelo bico (raio de curvatura da ponta) da ferramenta. O modelo geométrico teórico toma em consideração o avanço utilizado e o raio de curvatura da ponta da ferramenta que assegura o contato com a superfície a maquinar (Boothroy D. et Knight W., 1989). Assim sendo, apresenta-se para o cálculo da *amplitude máxima da rugosidade teórica (Rtt)* em [µm] a seguinte expressão:

$$R_{tt} = \frac{a^2}{8r_\epsilon} 1000 \quad (6)$$

E, para o cálculo da *rugosidade média aritmética teórica (Rta)* em [µm] utiliza-se uma expressão análoga:

$$R_{ta} = \frac{a^2}{32r_\epsilon} 1000 \quad (7)$$

sendo, em ambas as expressões (6) e (7), a o avanço em [mm/rot.] e r_ϵ o raio de ponta da ferramenta, expressa em [mm].

Do referido anteriormente, conclui-se que o avanço em conjunto com o raio de ponta da ferramenta é determinante na contribuição geométrica, que entra no acabamento de superfície obtido.

A precisão dimensional de uma peça, é muitas vezes, avaliada através dos graus de tolerâncias normais. Os graus de tolerâncias normais são representados pelo símbolo IT (intervalo de tolerância) seguido de um número que representa a sua ordem, desde o grau de maior exatidão (IT01-grau muito fino), até ao grau de menor exatidão (IT18-construção grosseira). (Simões Morais.,2006).

A precisão dimensional pode ser relacionada com a *rugosidade média aritmética* (R_a) através da seguinte expressão empírica (norma **UNI/ISO 3963/2**):

$$IT \approx 30R_a \quad (8)$$

Esta informação é obtida a partir da rugosidade da superfície maquinada e é de extrema importância na fase de projeto de um produto dada a necessidade de especificar as tolerâncias dimensionais das superfícies.

Relação entre parâmetros de maquinagem e acabamento superficial

Do ponto de vista geométrico, a rugosidade de uma superfície é proporcional ao quadrado do avanço e inversamente proporcional ao raio de ponta. Já a elevação da velocidade de corte provoca a redução das forças de maquinagem (devido à elevação da temperatura), o que resulta na melhoria do acabamento da peça. Por sua vez, o aumento da profundidade de corte causa a elevação das forças e a deterioração da qualidade superficial da peça.

O desgaste da ferramenta de corte influencia o acabamento das superfícies maquinadas. A rugosidade é o resultado da constante modificação da geometria da aresta de corte da ferramenta, combinada não só com o avanço bem como o tipo de material a maquinar (Jahanmir et al., 1998).

Os aços inoxidáveis têm tido problemas no que toca a acabamento superficial, pois têm altos valores de rugosidades durante a sua maquinagem, e por isso são conhecidos como aços de difícil maquinabilidade (Macari F. N. et Machado I. F., 2005).

Ibrahim Ciftci (2006), concluiu que a velocidade de corte tem um efeito significativo sobre os valores de rugosidade de superfícies maquinadas. Com o aumento da velocidade de corte, a rugosidade de superfície reduziu-se até um valor mínimo. Os valores mais elevados de rugosidade de superfície a velocidades mais baixas de corte foram atribuídos à elevada tendência de formação da apara aderente. O lascas das arestas de corte, evidenciada pelas imagens SEM (*Scanning Electron Microscope*), também foi visto como sendo responsável para os valores de rugosidade de superfícies elevadas.

Nikolaos I. G. et Dimitrios E. M. (2009), concluíram que a rugosidade da superfície torna-se melhor à medida que aumenta a velocidade de corte com a redução do avanço e profundidade de corte. Além disso, os valores da rugosidade aproximaram-se dos limites da norma **ISO 7206 – 6 (1992)** para as cabeças femorais ($Ra < 0,20 \mu m$). Utilizando *HSM*, consegue-se fabricar cabeças de fêmur com mais rapidez e facilidades e com uma qualidade de superfície perto ou, por vezes melhor do que os limites da Standard Internacional.

B. D. Jerold et M. P. Kumar (2012), observaram um melhor acabamento de superfície com o aumento da velocidade de corte. O aumento da velocidade de corte reduziu as forças de corte e com isso deu-se uma redução na temperatura de corte, o que resultou num melhor acabamento de superfície. Observaram ainda que com o aumento do avanço deu-se um aumento da rugosidade da superfície da peça maquinada.

Os mesmos autores verificaram que na maquinagem usando o CO_2 como fluido de corte, a rugosidade de superfície melhora em 57% quando comparado com a maquinagem a seco e melhora em 52% quando comparado com a maquinagem usando o óleo convencional como fluido de corte. Essa melhoria foi atribuída ao fato de haver uma melhor quebra da apara e uma menor acumulação da apara perto da zona de corte durante a maquinagem usando o CO_2 como fluido de corte e, com isso diminui o atrito da apara com a superfície maquinada.

Um dos grandes problemas que frequentemente aparece durante a maquinagem dos aços inoxidáveis austeníticos, mais concretamente os aços inoxidáveis da família do aço inoxidável AISI 316 são as tensões residuais. O estudo de tensões residuais de maquinagem é particularmente importante quando são maquinados os componentes estruturais críticos, especialmente se o objetivo é atingir altos níveis de fiabilidade. Este é o caso dos aços inoxidáveis austeníticos, amplamente utilizados para produzir os componentes estruturais críticos nas indústrias químicas e centrais nucleares (*Outeiro e al., 2006*). Dependendo da natureza (tensão de compressão ou de tração), eles poderiam melhorar ou prejudicar a

capacidade de um componente para suportar condições severas de carga em serviço, tais como: fadiga, fluência, corrosão sob tensão, etc.

Nos últimos anos, vários autores têm dedicado os seus estudos, quer experimentais quer numéricos, aos fatores que possam ser responsáveis pelo aparecimento de tensões residuais nas superfícies maquinadas do aço inoxidável AISI 316. De entre os fatores encontrados, os que foram considerados mais cruciais ao aparecimento de tensões residuais foram: a velocidade de corte; o avanço de corte; a profundidade de corte; as forças de corte; a natureza e geometria da ferramenta de corte e as propriedades dos materiais.

Outeiro et al., (2002) notaram que a tensão residual, tanto na direção axial (σ_x), como na direção circunferencial (σ_y), tende a aumentar com o avanço, mas tende a diminuir com a velocidade e a profundidade de corte. As tensões residuais na direção axial (σ_x) só alteram significativamente com a profundidade de corte, permanecendo quase inalteradas para variação da velocidade de corte e avanço. Mas, apresentam um comportamento oposto na direção circunferencial (σ_y).

M'Saoubi et al., (1999) notaram que a tensão de corte aumenta com o aumento da velocidade de corte e que o avanço não exerce uma influência significativa sobre as tensões residuais. As tensões residuais não sofreram grandes variações com o avanço.

Outeiro et al., (2006) concluíram que de todos os parâmetros da geometria da ferramenta de corte, o ângulo de inclinação e o raio de ponta exercem fortes influências sobre as tensões residuais. O aumento do raio de ponta provoca uma diminuição nas tensões residuais.

M'Saoubi et al., (1999) concluíram que as tensões residuais superficiais na direção circunferencial diminuíram ligeiramente com o aumento do ângulo de ataque.

Outeiro et al., (2006) notaram que o revestimento da ferramenta de corte tem uma influência sobre as tensões residuais. Perante a maquinagem usando uma ferramenta com revestimento e uma outra sem revestimento, notou maiores tensões residuais quando foi usado ferramenta revestida do que quando foi usado ferramenta não revestida.

2.4 Síntese

O uso do aço inoxidável AISI 316 tem vindo a aumentar a nível mundial graças à sua resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas, boa biocompatibilidade e baixo custo. É amplamente utilizado na produção dos componentes estruturais mais críticos das indústrias química e centrais nucleares, indústria mecânica, naval, petrolífera, farmacêutica, têxtil, papel e celulose, borracha, nylon e indústrias de tintas.

Mesmo sendo muito utilizada, a sua maquinagem é, geralmente, considerada como sendo difícil, por causa de propriedades específicas, como a alta taxa de deformação, formação de aparas longas e a baixa condutividade térmica.

Devido à difícil maquinagem deste aço, ao longo deste capítulo, efetuou-se uma abordagem sobre a maquinagem por arranque de apara do aço inoxidável AISI 316, tendo em conta alguns parâmetros avaliadores tais como: a força de corte, a temperatura de corte, a forma e o tipo da apara obtida, a integridade superficial/precisão dimensional da peça e o desgaste das ferramentas.

Foi descrito o comportamento aço inoxidável AISI 316 a partir de testes executados por vários autores para uma vasta gama de parâmetros de corte, tendo sido comprovada a difícil maquinabilidade deste aço. Assim, justifica-se o estudo da maquinabilidade de aço inoxidável AISI 316 proposto nesta dissertação.

3 Metodologia Experimental

3.1 Considerações Gerais

Neste capítulo apresenta-se as condições em que os ensaios foram realizados, o planeamento experimental, a máquina- ferramenta, as características do material maquinado, as especificações das ferramentas de corte e dos parâmetros de maquinagem, visando facilitar a compreensão da metodologia utilizada e possibilitar a reprodução deste processo, e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

Todos os procedimentos experimentais foram realizados no laboratório de tecnologia mecânica do departamento de engenharia mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro (UA).

3.2 Material ensaiado

O material usado neste trabalho de investigação foi o aço inoxidável AISI 316, fornecido pela empresa F Ramada®, com a composição química e características mecânicas descritas na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respetivamente e certificado conforme o apresentado na Figura 6.3, em anexo.

Inicialmente o provete tinha o comprimento de 500 mm e o diâmetro de 100 mm, apresentando o aspeto que se pode observar na Figura 3.1. Para os ensaios de corte programados para este trabalho de investigação, foram efetuados cortes ao provete inicial. Após os cortes, cada um dos provetes passou a ter um comprimento final de 150 mm.



Figura 3.1 - Aspeto do provete do aço inoxidável AISI 316 utilizado nos ensaios.

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Tabela 3.1 – Composição Química do aço inoxidável AISI 316 usado nos ensaios.

Composição Química (%)								
Material	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	P
AISI 316	17,50	12,00	2,50	2,00	1,00	0,08	0,03	0,0045

Tabela 3.2 – Características Mecânicas do aço inoxidável AISI 316 usado nos ensaios.

Características Mecânicas	AISI 316
Dureza (HB max.)	240
Tensão de rutura [kg/mm ²]	62
Tensão limite de elasticidade [kg/mm ²]	=> 21
Extensão após rutura (A%)	=> 40

3.3 Ferramentas de corte

Na fixação das pastilhas de corte foi utilizado um porta-ferramentas SDJCL 2020K 11 com fixação por parafuso, da Sandvik ⁹, como se ilustra na Figura 3.2. O porta-ferramentas permite obter, em conjunto com a pastilha de corte, a geometria de corte de cada um dos tipos de ferramenta, apresentadas na Tabela 3.3.



Figura 3.2 – Porta- ferramenta utilizado nos ensaios (Sandvik, 2002).

Tabela 3.3 – Identificação e geometria de corte das ferramentas utilizadas nos ensaios (Sandvik, 2010).

Ferramenta	ISO	Ângulo de ataque γ (°)	Ângulo de posição χ (°)	Raio de curvatura da ponta r_ϵ (mm)	Ângulo de saída α (°)	Ângulo de inclinação λ_s (°)
M25	Sandvik DCMT 11 T3 04-UM	0	93	0,4	11	0
P25	Sandvik DCMT 11 T3 04-PF	0	93	0,4	11	0

⁹ <http://www.sandvik.com>

Em todos os ensaios de corte (curtos e longos) foram utilizadas pastilhas de corte de carboneto sinterizado M25 (Sandvik DCMT 11 T3 04 – UM) com quebra-apara, com um revestimento de tripla camada de TiCN/Al₂O₃/TiC e com uma espessura de revestimento de 5,5 µm (Figura 3.3a)), e pastilhas de corte P25 (Sandvik DCMT 11 T03 04 - PF) com quebra-apara e sem revestimento (Figura 3.3b)).



Figura 3.3 - Pastilhas de corte utilizadas nos ensaios experimentais a) DCMT 11 T03 04-UM (revestida), b) DCMT 11 T03 04 - PF (sem revestimento).

3.4 Máquina-ferramenta

A experimentação no domínio da maquinagem exige a utilização preferencial de máquinas-ferramentas de elevada potência, rigidez e precisão.

Na execução do plano de ensaios de torneamento, foi utilizado o Torno CNC Kingsbury MHP 50 com 18 kW de potência e rotação máxima de 4500 rpm, que se pode observar na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Torno CNC Kingsbury MHP 50 instalado no Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEM da Universidade de Aveiro (cortesia do DEM-UA).

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

O torno CNC possui um controlador FANUC, uma bucha de aperto hidráulico capaz de fixar peças até 200mm de diâmetro, uma torreta para armazenamento de ferramentas com capacidade até 12 ferramentas (Figura 3.5) e um contraponto de 70 mm de diâmetro ativado também por acionamento hidráulico.



Figura 3.5 - Bucha e Torreta do torno CNC Kingsbury MHP 50 (cortesia do DEM-UA).

A Tabela 3.4 apresenta as principais características do Torno CNC utilizado no plano de ensaios de torneamento.

Tabela 3.4- Características do torno CNC Kingsbury MHP 50.

Contraponto	
Diâmetro	72 mm
Acionamento	Hidráulico
Bucha	
Distancia max. Efect. entre a bucha e o contraponto	500 mm
Acionamento	Hidráulico
Diâmetro máximo da bucha	200 mm
Posicionamento rápido dos eixos	
Eixo X	10 m/min
Eixo Z	10 m/min
Torreta	
Ferramenta de corte (interna e externa)	12
Tempo de indexação	1,2 s
Outras características	
Velocidade máxima de rotação	4500 rpm
Potência máxima	25 cv
Controlador	Fanuc séries O-T
Peso (aproximado)	4 ton.
Distância longitudinal (eixo Z)	550 mm
Distância transversal (eixo X)	200 mm

3.5 Parâmetros de corte para os diversos tipos de ensaios de corte

Os parâmetros de corte são muito importantes na obtenção de peças com boa qualidade, quer em termos de forma, de dimensão, quer em termos da qualidade de superfície obtida. Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios durante o processo de experimentação dependem do tipo de teste efetuado.

Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios de corte curtos para maquinar o aço inoxidável AISI 316 encontram-se representados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de corte curtos.

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot.]	Profundidade de corte [mm]
300	0,05	1
	0,1	
	0,2	
	0,4	
150	0,05	1
	0,1	
	0,2	
	0,4	
75	0,05	1
	0,1	
	0,2	
	0,4	

Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios de corte longos para maquinar o aço inoxidável AISI 316 encontram-se representados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de corte longos

Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot.]	Profundidade de corte [mm]
300	0,1	2
75		

3.5.1 Estratégia de corte

Nesta secção será apresentada a estratégia de corte adotada para os dois tipos de ensaios de corte usados neste estudo, nomeadamente os ensaios de corte curtos e longos. Antes de iniciar os ensaios de corte, foi realizado um desbaste de 2mm ao diâmetro da peça inicial, com o objetivo de corrigir possíveis desvios dimensionais. Com isso, a peça passou a ter um diâmetro de 98mm. Para uma maior segurança durante o trabalho, foi utilizado o contra-ponto em todos os ensaios de cortes realizados.

Ensaio de corte curtos

Os ensaios de corte curtos foram realizados de acordo com a Figura 3.6.

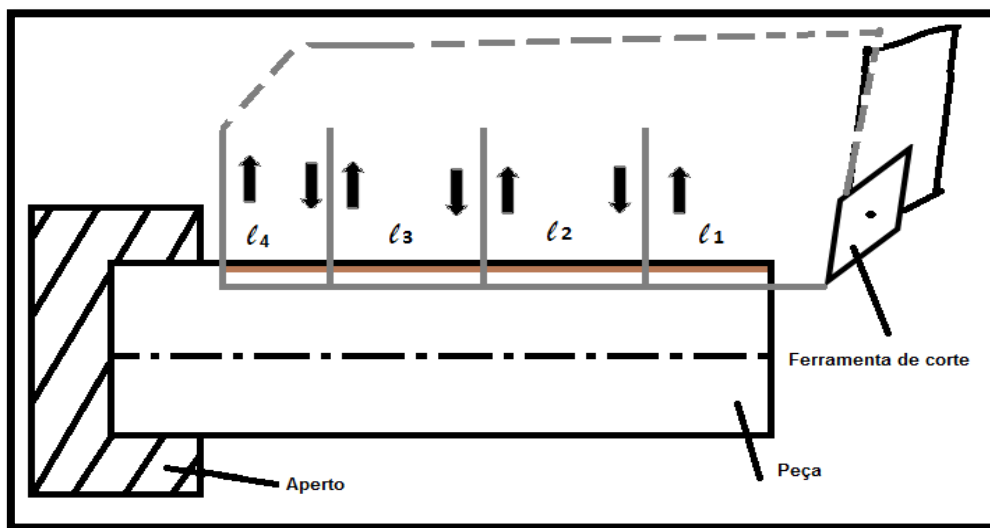


Figura 3.6 – Ilustração dos ensaios de corte curtos.

A ferramenta de corte avança sobre a peça e efetua o corte na primeira pista (l1), de 15 mm de comprimento, com os parâmetros de corte predefinidos ($V_c=300$ m/min; $a=0,05$ mm/rot. e $p=1$ mm). Após a primeira passagem, a ferramenta sobe e efetua-se a paragem da máquina para proceder à recolha da apar. Posteriormente, são efetuados os mesmos procedimentos para as pistas l2, l3 e l4, mas com diferentes parâmetros de corte (muda-se o avanço, mantém-se a velocidade de corte e a profundidade de corte). No final efetua-se a paragem da máquina, retira-se a peça e procede-se a medição dos parâmetros de rugosidade. Após efetuar as medições das rugosidades, volta-se a efetuar os mesmos procedimentos descritos anteriormente, mas desta vez, alterando a velocidade de corte. A primeira velocidade de corte usada foi a de 300 m/min, depois foi usada a de 150 m/min e por ultimo, a de 75 m/min. Os avanços usados foram pela seguinte ordem: 0,05; 0,1; 0,2 e 0,4 mm/rot.

Ensaio de corte longos

Os ensaios de corte curtos foram realizados de acordo com a Figura 3.7.

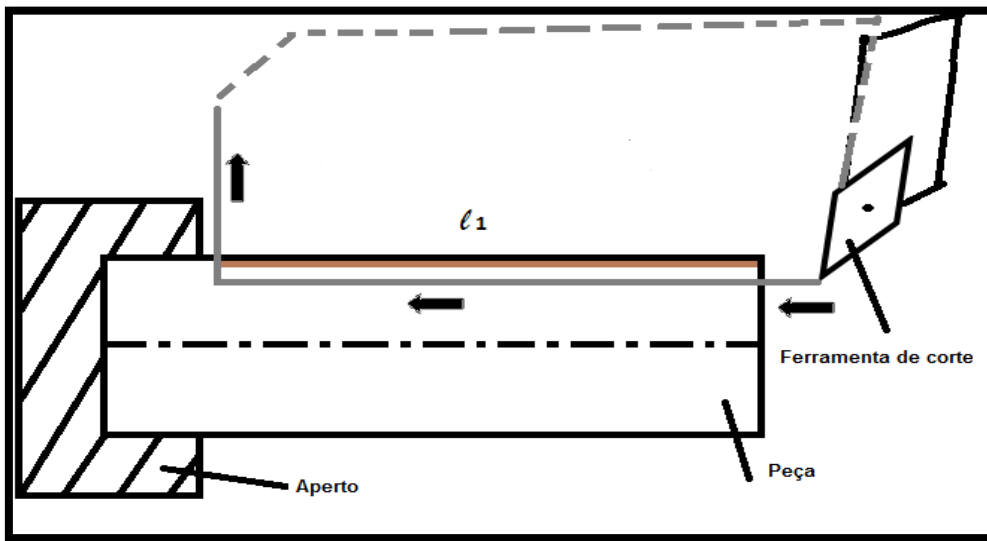


Figura 3.7 - Ilustração dos ensaios de corte longos.

Com os parâmetros de corte predefinidos ($V_c=300$ m/min; $a=0,1$ mm/rot. e $p=2$ mm), a ferramenta avança sobre a peça e efetua o corte na pista l_1 (60 mm). Ao terminar a passagem, a ferramenta sobe, pára-se a máquina e procede-se o recolher da aparada obtida, efetua-se a medição do desgaste da ferramenta e dos parâmetros de rugosidade. Repete-se o procedimento até se atingir o critério de paragem ($VB=0,25$ mm). Após atingir o critério de paragem, procede-se à alteração dos parâmetros de corte ($V_c=75$ m/min; $a=0,1$ mm/rot. e $p=1$ mm) e da pastilha de corte e efetua-se os mesmos procedimentos descritos anteriormente até atingir novamente o critério de paragem ($VB=0,25$ mm). Note-se que a primeira velocidade de corte usada foi de 300 m/min e a última foi 75 m/min.

3.6 Métodos de caracterização de superfície

3.6.1 Acabamento de superfície

O acabamento de superfície é um critério muito importante para caracterizar a maquinabilidade de um material. Dentro de várias técnicas existentes para caracterizar o acabamento de superfície, a rugosimetria é a mais vulgarmente utilizada.

Para caracterizar a rugosidade da superfície, foi utilizado o rugosímetro de agulha de diamante Hommel Tester T1000E, que se pode observar na Figura 3.8, com impressora integrada. Tem como principais características uma resolução máxima de $0,01\mu\text{m}$, um campo

de medição de cerca de 80 μm , um cut-off (LC) de 0,25 e 0,8, categoria 1 de precisão conforme **DIN 4772** e é equipado com um menu de controlo e um ecrã para a apresentação gráfica dos resultados. Utiliza um software designado Turbo Datawin.

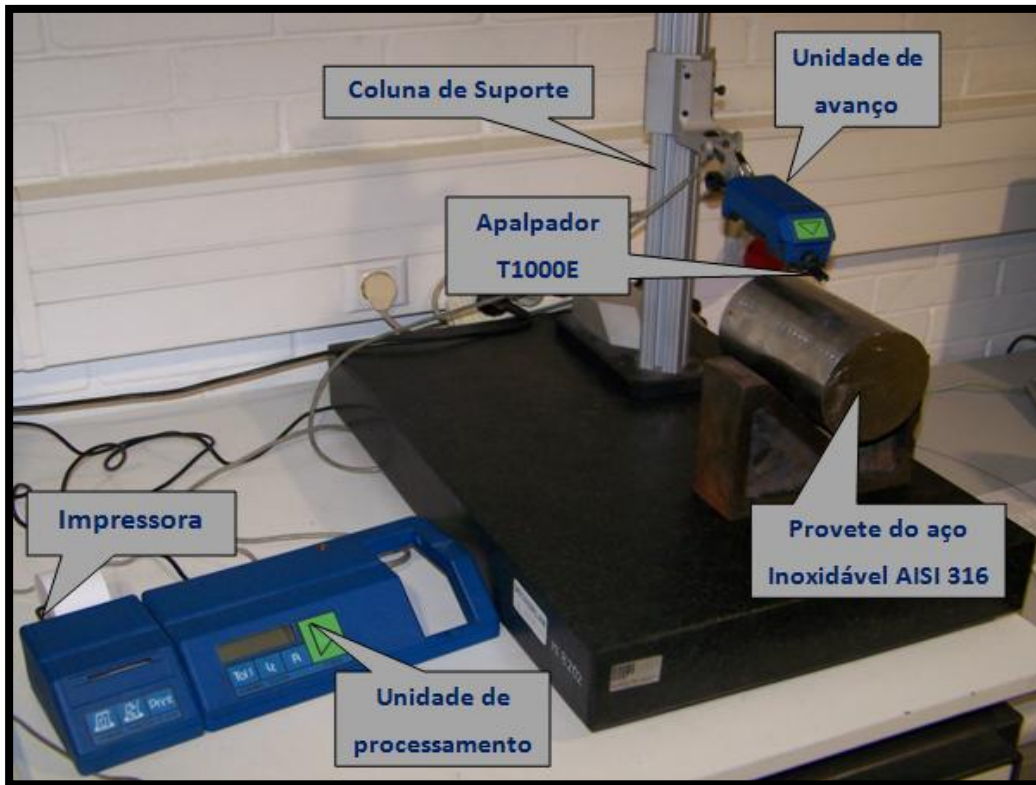


Figura 3.8 - Medição da rugosidade da superfície do provete de ensaio (aço inoxidável AISI 316) com o rugosímetro Hommel Tester T1000 E (cortesia DEM-UA).

Os parâmetros de amplitude selecionados foram a rugosidade média aritmética (R_a), e a amplitude máxima do perfil da rugosidade (R_t) que respeitam a norma **ISO 4287/1**.

A medição dos parâmetros de rugosidade da peça produzida foi efetuada em três pontos distintos separados cerca de 120° , conforme ilustrado na Figura 3.9. os parâmetros utilizados foram: cut-off (L_c) de 0,8 mm e comprimento de palpagem (L_t) de 4,8mm.

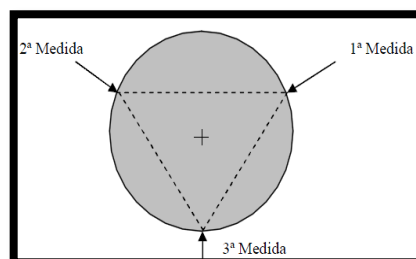


Figura 3.9 - Pontos de medição dos parâmetros de rugosidade.

3.6.2 Medição do desgaste da ferramenta

O desgaste na face de saída da ferramenta é a medida de desgaste mais usada, uma vez que é mais fácil efetuar a sua medição como se pode observar na Figura 3.10. Este desgaste é quantificado sobretudo por três parâmetros: VB, VBmáx. e VC segundo a norma **ISO 3685/1993**. O primeiro parâmetro corresponde ao desgaste médio e o segundo parâmetro corresponde ao desgaste máximo, ambos na zona de desgaste linear da marca de desgaste verificada na face de saída. O parâmetro VC corresponde ao desgaste junto da ponta da ferramenta na face de ataque.

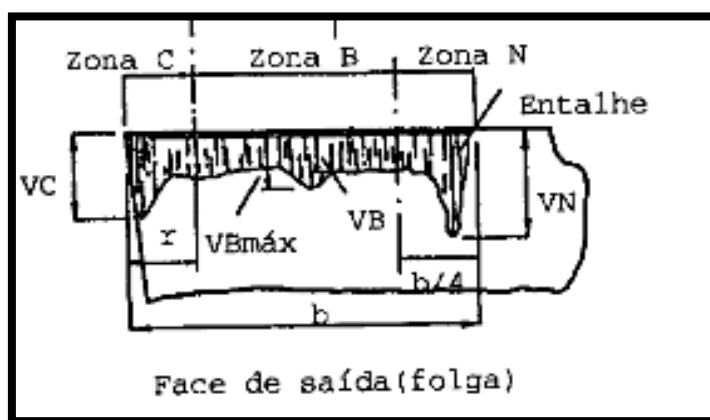


Figura 3.10 – Formas de desgaste típicas das ferramentas segundo a ISO 3685/1993.

A observação do desgaste das ferramentas realizada no final de cada ensaio permitiu verificar a existência ou não de desgaste, bem como, a evolução deste a fim de determinar a vida da pastilha.

Para cada ensaio foi medido o desgaste VB da ferramenta obtido no final de cada passagem. A medição do desgaste nas pastilhas de corte foi efetuada na face de saída da ferramenta de corte, para tal foi usado o microscópio ótico de oficina Mitutoyo TM-500 com ampliação 30X, com uma precisão de 0,001 mm e o microscópio ótico Nikon Eclipse LV 150 que se encontra ligado ao computador através de vídeo Software Perfect Image V7.5, conforme se observa na Figura 3.11 e Figura 3.12, respetivamente.

A pastilha de corte é colocada na mesa de observação à qual pode efetuar movimentos de translação perpendiculares através do acionamento dos respetivos fusos onde está acoplado em cada um deles um mostrador digital que nos mostra o deslocamento efetuado pelos mesmos.



Figura 3.11 - Microscópio de oficina Mitutoyo TM (cortesia DEM-UA).



Figura 3.12 - Microscópio óptico Nikon Eclipse LV150 (cortesia DEM- UA).

3.6.3 Caracterização da apara

A apara obtida foi caracterizada segundo a forma e o tipo. A Norma **ISO 3685/1993** permite-nos fazer a caracterização da apara, resultante não só das condições de corte e da ferramenta, mas, também do próprio material em estudo. A Norma acima referida classifica as aparas resultantes do processo de maquinagem em 18 categorias (Figura 3.13).
















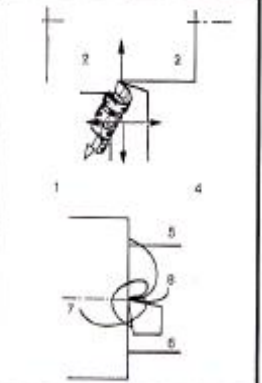




1. Em fita	2. Tubular	3. Espiral	4. Helicoidal em gume	5. Helicoidal Cônica	6. Em arco	7. Em lasca	8. Em agulha
							
1.1. Longa	2.1. Longa	3.1. Plana	4.1. Longa	5.1. Longa	6.1. Ligada		
							
1.2. Curta	2.2. Curta	3.2. Cônica	4.2. Curta	5.2. Curta	6.2. Fragmento		
							
1.3. Enrolada	2.3. Enrolada		4.3. Enrolada	5.3. Enrolada			

Figura 3.13 - Formas de apara segundo a Norma ISO 3685/1993.

Durante o estudo da maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316, trabalhou-se com vários parâmetros de corte obtendo-se por isso aparas de diferentes características. Por cada ensaio, recolheu-se as aparas resultantes do processo de maquinagem sendo sujeitas posteriormente à sua classificação segundo a Norma **ISO 3685/1993**.

3.7 Síntese

O organograma apresentado na Figura 3.14 resume, de uma forma clara, todo o desenvolvimento experimental associado a este trabalho.

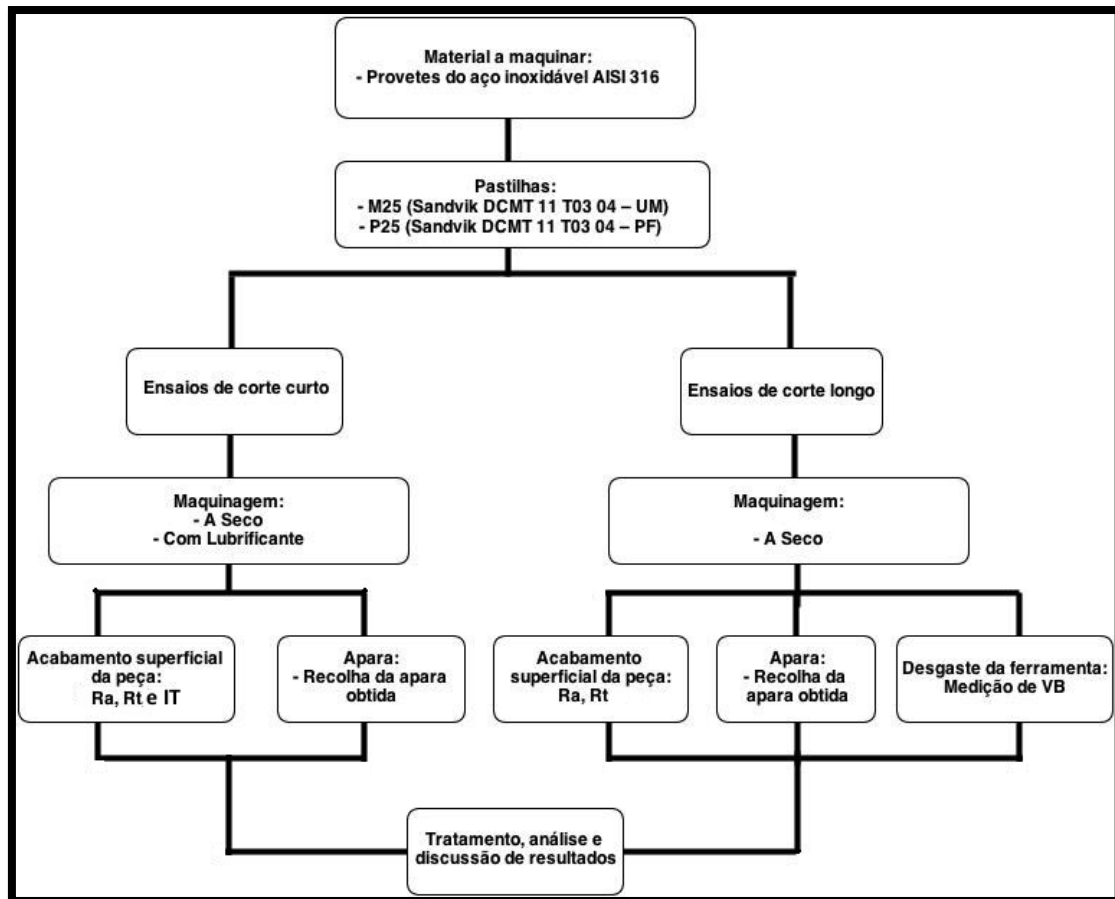


Figura 3.14 - Organograma do desenvolvimento do trabalho experimental.

4 Análise e Discussão de Resultados

Ao longo do estudo efetuado foram obtidos resultados que serão analisados e discutidos neste capítulo. Essa análise e discussão encontra-se dividida em duas partes distintas: análise de resultados obtidos nos ensaios de corte curtos e análise dos resultados obtidos nos ensaios de corte longos.

Na análise de resultados obtidos nos ensaios de corte curtos, inicialmente foram apresentadas as aparas obtidas. Posteriormente foram apresentados os acabamentos de superfícies, onde foram mostradas imagens de superfícies maquinadas obtidas e também os gráficos com resultados de rugosidades, mais concretamente a rugosidade média aritmética (Ra) e a rugosidade máxima (Rt) e os gráficos dos intervalos de tolerância (IT) usadas para classificar a precisão dimensional da superfície maquinada obtida.

Na análise de resultados obtidos nos ensaios de corte longos, foram efetuadas as mesmas análises descritas nos ensaios de corte curtos e também foram apresentados os desgastes obtidos nas pastilhas de corte e a curva de vida das ferramentas de corte.

4.1 Análise de maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 (ensaios de corte curtos)

A análise da maquinabilidade dos ensaios de corte curtos, passou por determinar a forma das aparas obtidas, a evolução do acabamento da superfície das peças (Ra e Rt) (Tabela 6.4 à Tabela 6.7, em anexo) e classificar a precisão dimensional da superfície maquinada obtida, através dos gráficos de IT (Tabela 6.13 à Tabela 6.14, em anexo)

Foram efetuados ensaios de corte curtos de maquinagem usando dois tipos de materiais de ferramenta (M25 e P25), em pastilhas com igual geometria. Foram efetuados ensaios a seco e ensaios com fluido de corte. Utilizou-se três velocidades de corte diferentes (75, 150 e 300 m/min), quatro avanços diferentes (0,05; 0,1; 0,2 e 0,4 mm/rot.) e uma profundidade de corte constante igual a 1 mm em todos os ensaios.

4.1.1 Forma de aparas obtidas

Em geral, as aparas obtidas nos ensaios de corte curtos foram da forma 4.1 (helicoidal em gume longa), 6.1 (em arco, ligado) e 6.2 (em arco, fragmentado) segundo a norma **ISO 3685/1993**.

4.1.1.1. *Aparas obtidas com a Ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara)*

Da Figura 4.1 à Figura 4.3 pode observar-se exemplos de formas de aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara), para três velocidades de corte diferentes, quatro avanços diferentes, profundidade de corte constante, em ensaios a seco e com fluido de corte.

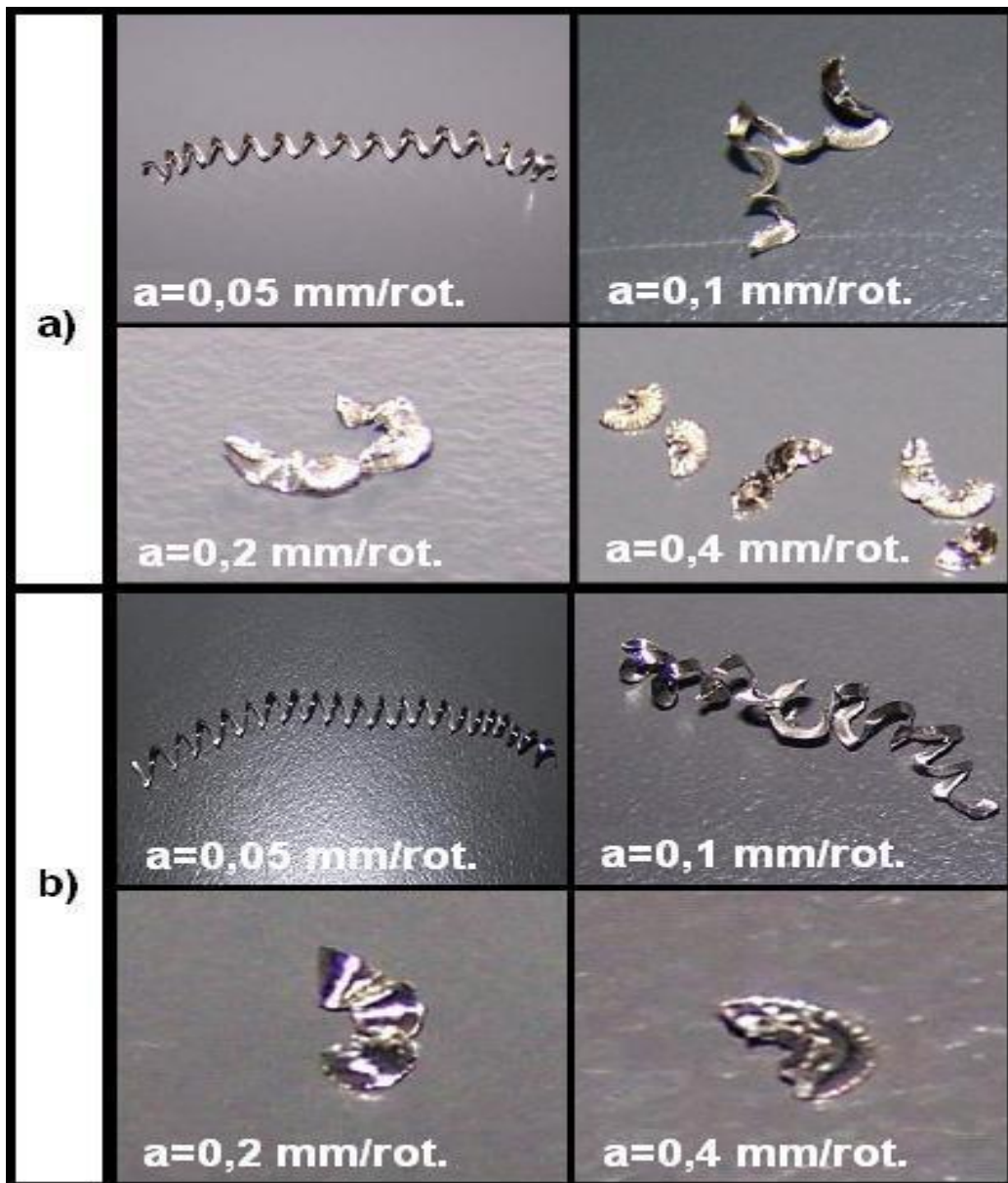


Figura 4.1 – Aparas obtidas (1,5X) no ensaio de corte curto com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara), $V_c=300$ m/min, $p=1$ mm; a) a seco; b) com fluido de corte.

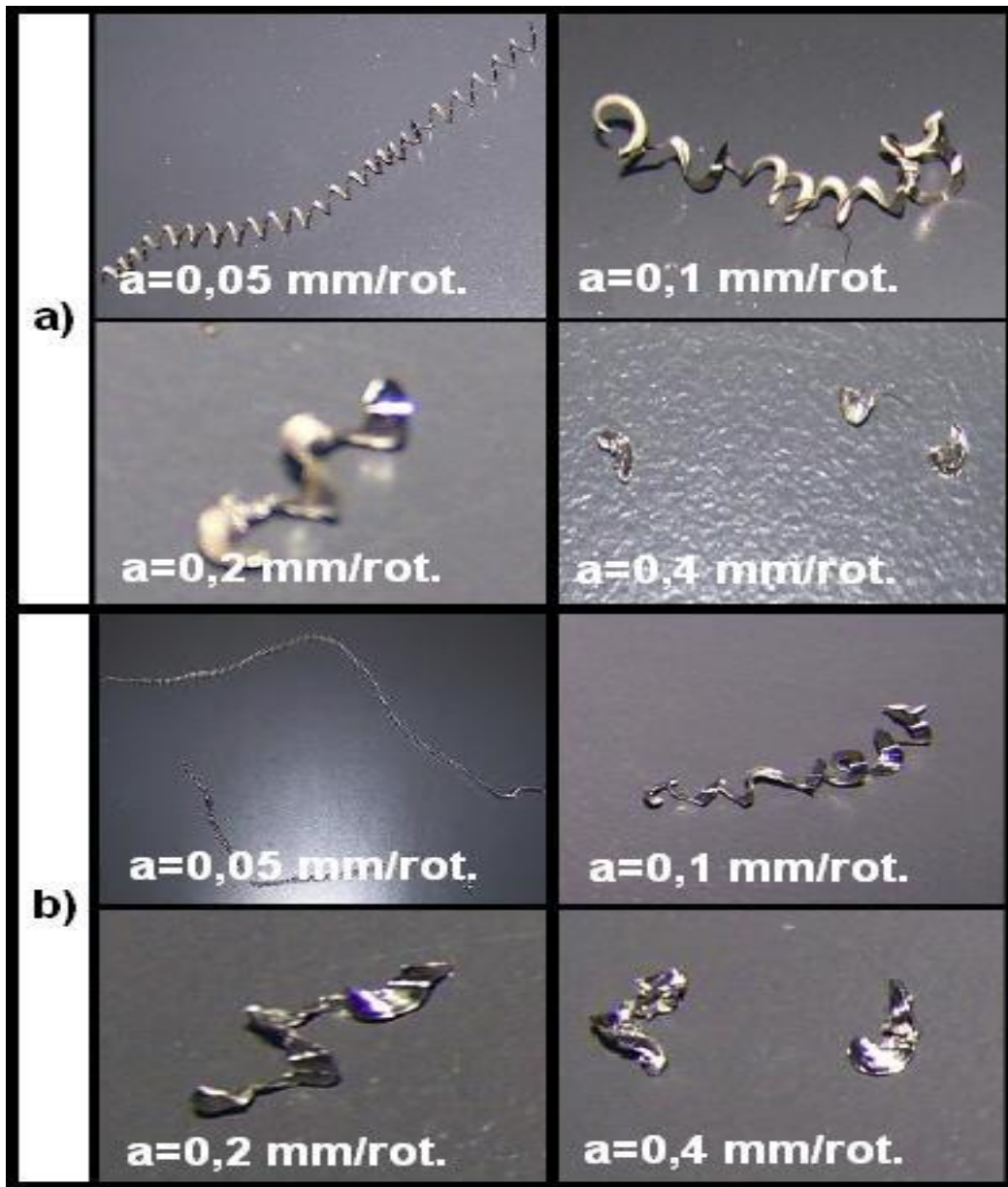


Figura 4.2 – Aparas obtidas (1,5X) no ensaio de corte curto com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara), $V_c=150$ m/min, $p=1$ mm; a) a seco; b) com fluido de corte.

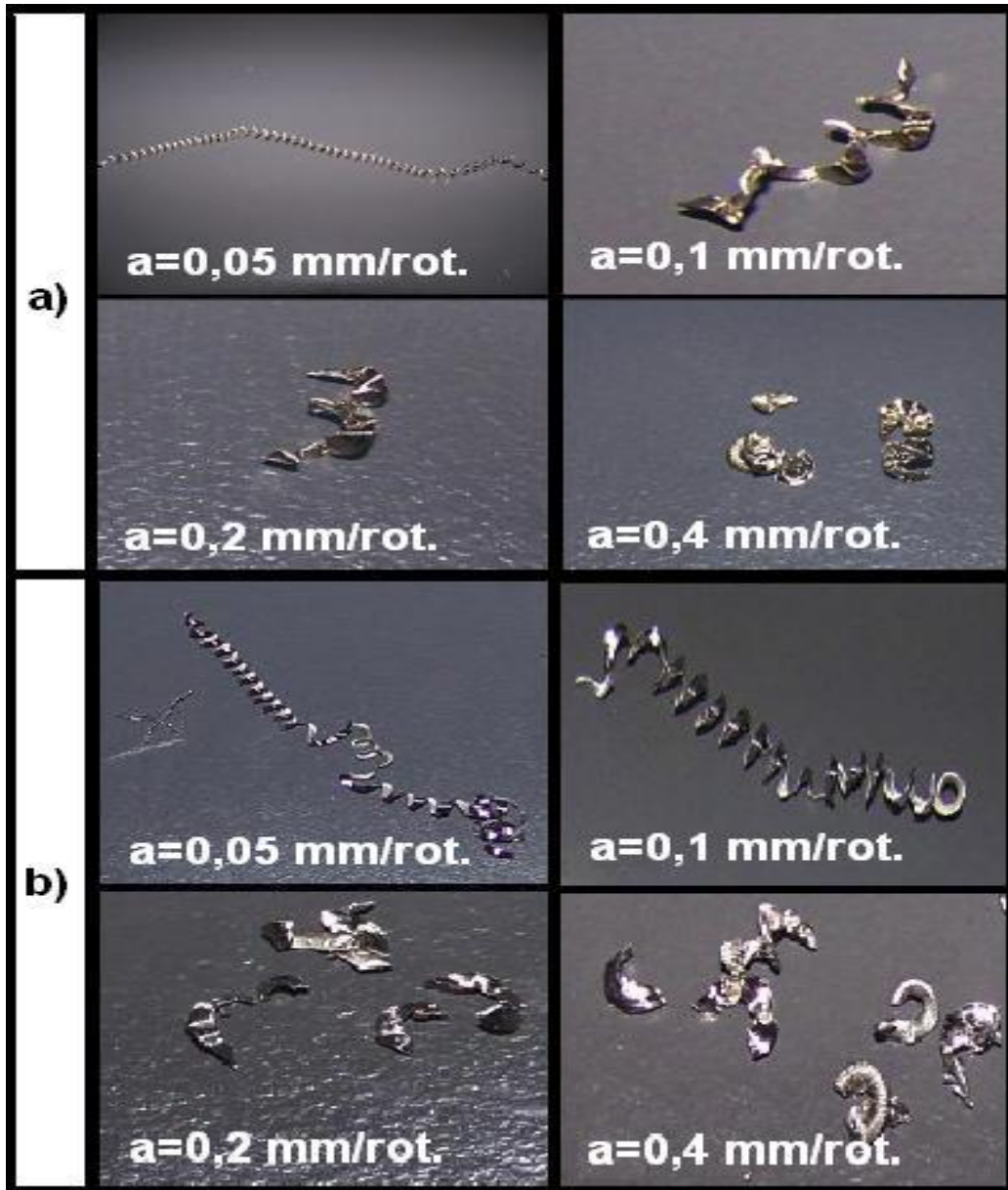


Figura 4.3 – Aparas obtidas (1,5X) no ensaio de corte curto com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara), $V_c=75$ m/min, $p=1$ mm; a) a seco; b) com fluido de corte.

Pela análise das Figuras acima apresentadas, foi possível constatar que a velocidade de corte, a profundidade de corte e o fluido de corte têm pouca influência na forma da apara. Único parâmetro de corte que influencia de um modo significativo a forma da apara é o avanço. Com o $a=0,05$ mm/rot. obteve-se sempre uma apara helicoidal em gume e longa e com os restantes avanços obteve-se aparas em arco ligado e em arco fragmentado.

4.1.1.2 Aparas obtidas com a Ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara)

Da Figura 4.4 à Figura 4.6 pode observar-se exemplos de formas de aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a pastilha P25 (sem revestimento e com quebra-apara), para três velocidades de corte diferentes, quatro avanços diferentes, profundidade de corte constante, em ensaios a seco e com fluido de corte.

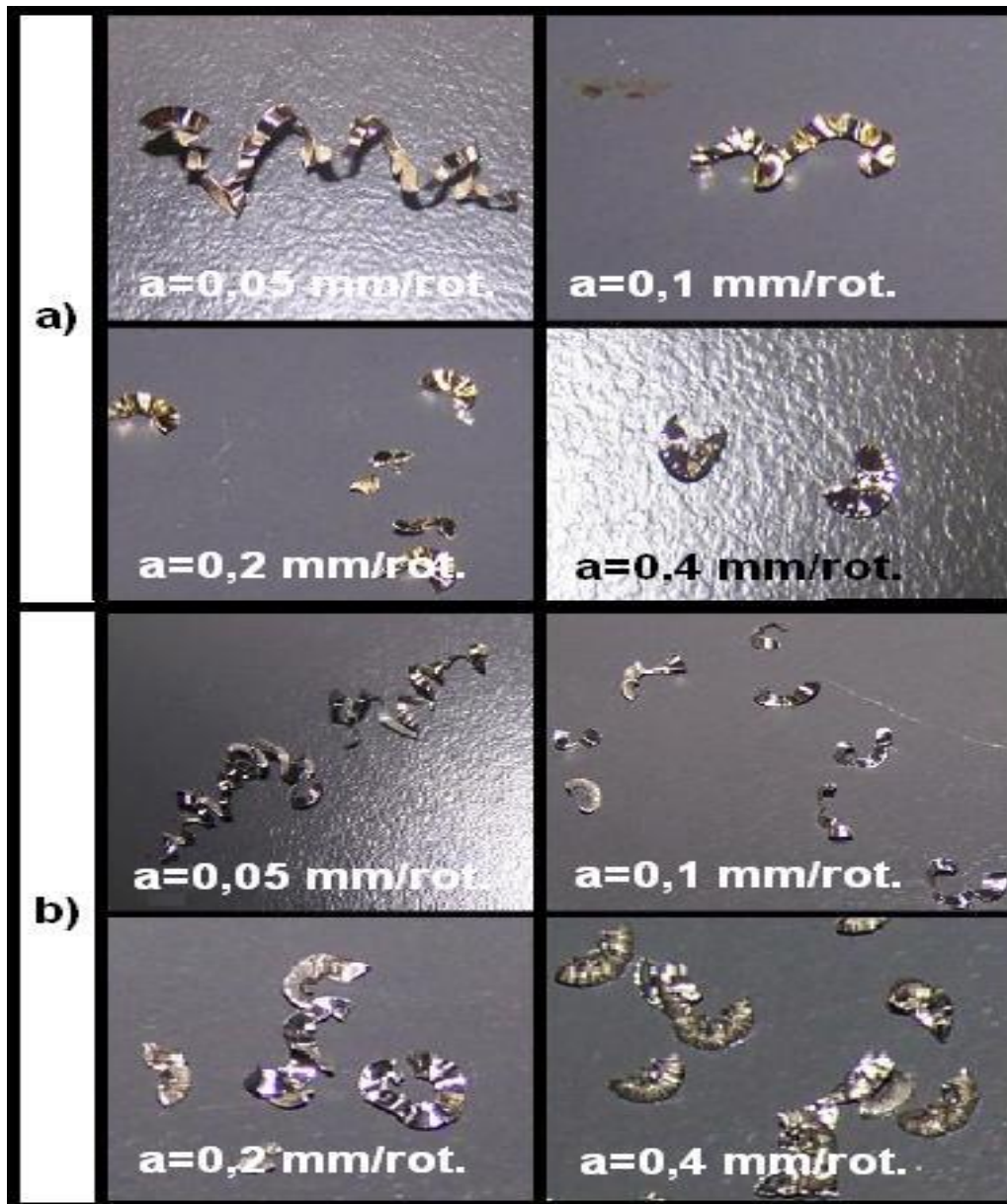


Figura 4.4 – Aparas obtidas (1,5X) no ensaio de corte curto com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara), $V_c=300$ m/min, $p=1$ mm; a) a seco; b) com fluido de corte.

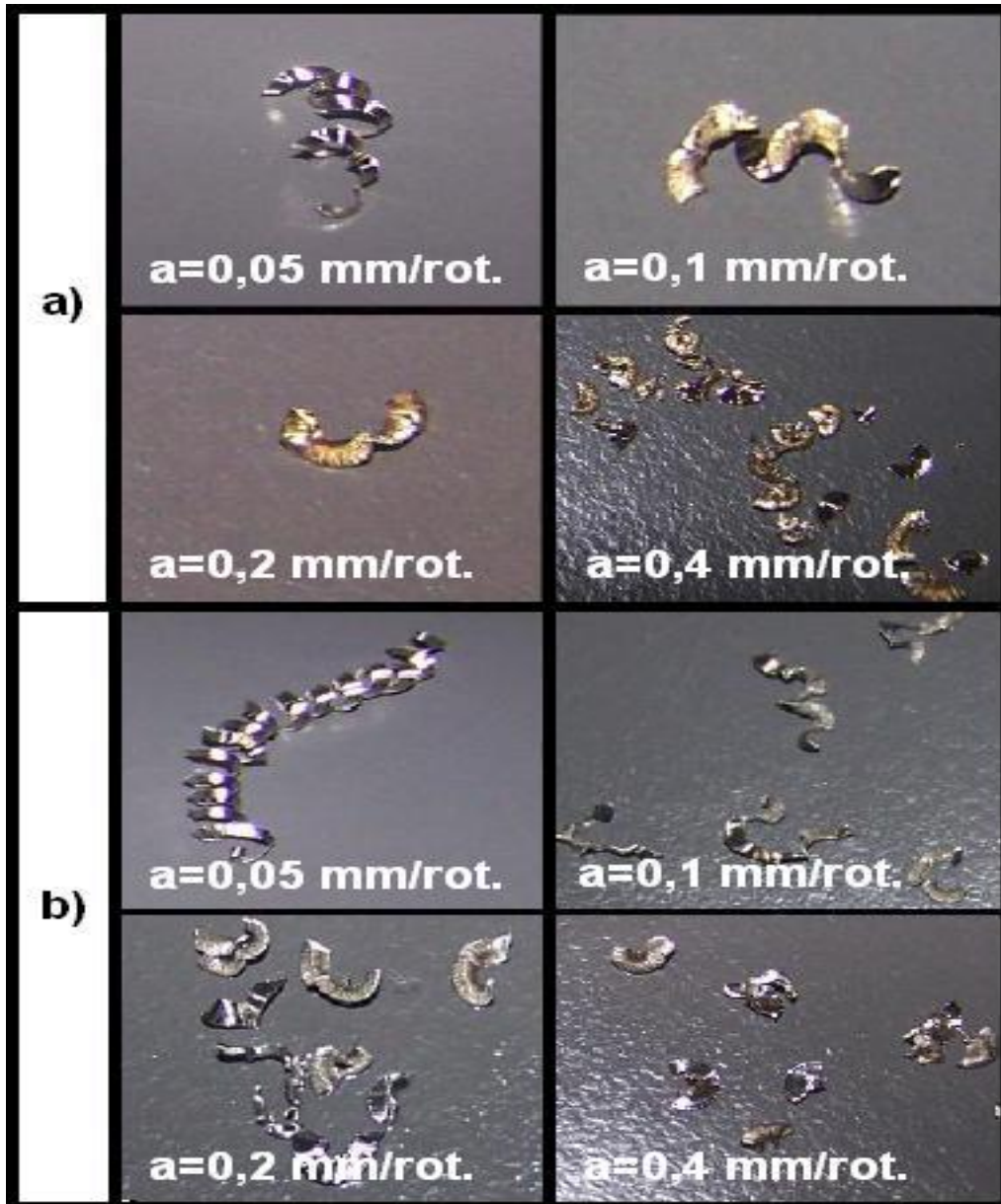


Figura 4.5 – Aparas obtidas (1,5X) no ensaio de corte curto com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara), $V_c=150$ m/min, $p=1$ mm; a) a seco; b) com fluido de corte.

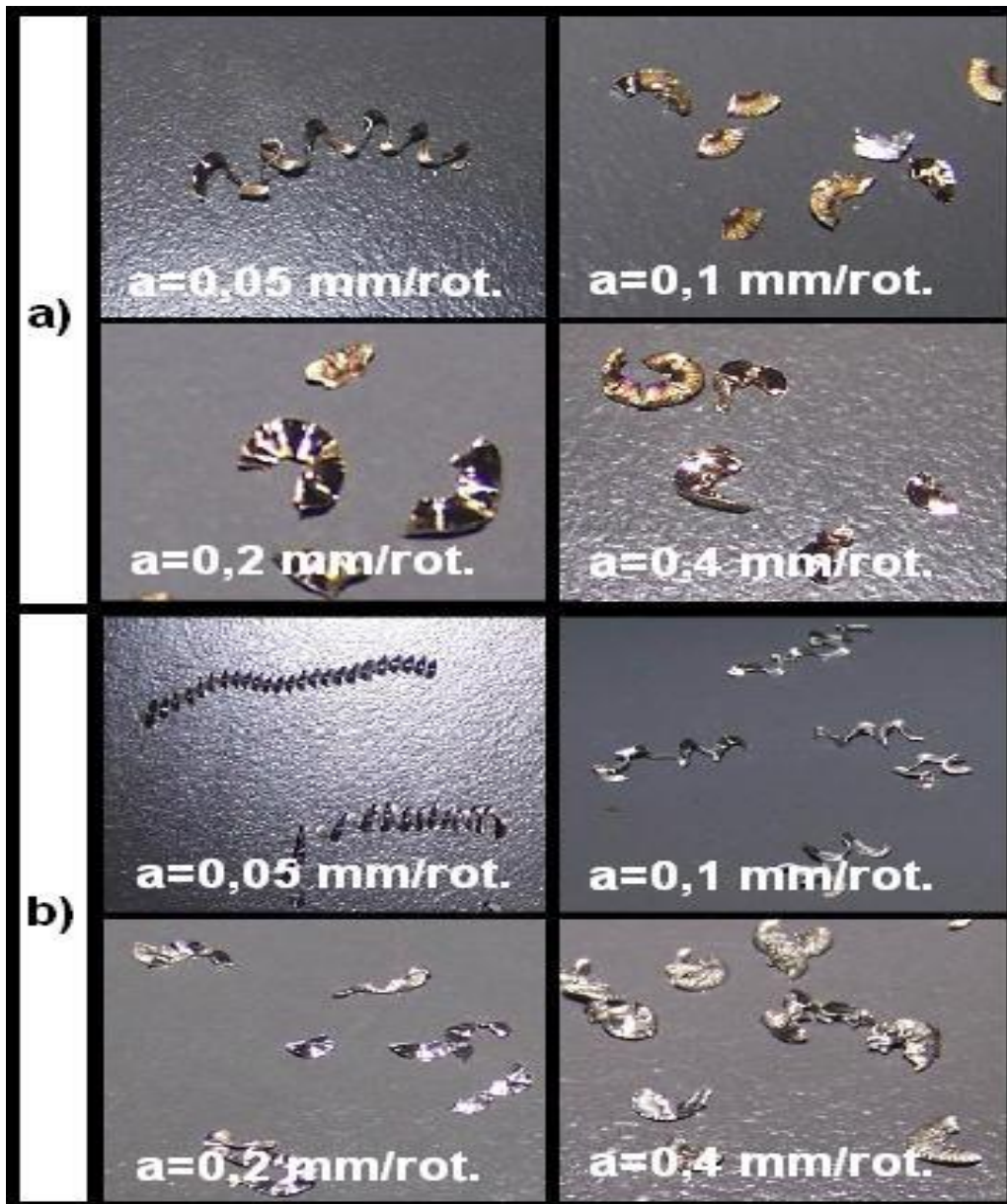


Figura 4.6 – Aparas obtidas (1,5X) no ensaio de corte curto com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara), $V_c=75$ m/min, $p=1$ mm; a) a seco; b) com fluido de corte.

Analisando as Figuras acima apresentadas, constata-se que o avanço tem uma forte influência na forma da apara e que a velocidade de corte, a profundidade de corte e o fluido de corte não influenciam muito na forma da apara. Para a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) obteve-se quase sempre aparas em arco ligada e em arco fragmentada.

Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo da classificação da forma das aparas obtidas nos ensaios curtos, com as duas ferramentas de corte (M25 e P25) e em regime a seco e com fluido de corte.

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Tabela 4.1 – Quadro Resumo da classificação da forma das aparas obtidas nos ensaios curtos.

a [mm/rot.]	Vc=300 m/min				Vc=150 m/min				Vc=75 m/min			
	A seco		Com fluido de corte		A seco		Com fluido de corte		A seco		Com fluido de corte	
	M25	P25	M25	P25	M25	P25	M25	P25	M25	P25	M25	P25
0,05	4.1	6.1	4.1	6.1	4.1	6.1	4.1	4.1	4.1	6.1	4.1	4.1
0,1	6.1	6.1	6.1	6.2	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.2	4.1	6.1
0,2	6.2	6.2	6.1	6.2	6.1	6.2	6.1	6.2	6.1	6.2	6.2	6.2
0,4	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2

O caso mais crítico da mudança da forma da apara foi observado na maquinagem tanto a seco como com fluido de corte, para a Vc=75 m/min e em ambas as ferramentas de corte.

4.1.2 Integridade superficial/precisão dimensional

De seguida analisou-se os resultados da rugosidade, em particular a rugosidade média aritmética (Ra) (ISO 4287/1), que é o parâmetro mais utilizado para controlar a qualidade de superfície das peças maquinadas, a rugosidade máxima (Rt) (ISO 4287/1), que é sensível aos grandes desvios a linha média do perfil, com os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) do aço inoxidável AISI 316.

É de referir, que os gráficos dos parâmetros de rugosidades são apresentadas apenas para três avanços (0,05; 0,1 e 0,2 mm/rot.) e as imagens das superfícies maquinadas são apresentadas para os quatro avanços usados nos testes (0,05; 0,1; 0,2 e 0,4 mm/rot.). Adotou-se esta medida porque para o avanço a=0,4 mm/rot. as superfícies maquinadas apresentavam-se bastante rugosas, o que impossibilitava a medição dos parâmetros de rugosidades.

4.1.2.1 Integridade superficial/precisão dimensional obtida com a Ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) na maquinagem a seco e com fluido de corte

Nesta secção, serão apresentados os resultados de acabamento de superfície, nomeadamente as superfícies maquinadas, os parâmetros de rugosidades e o gráfico de intervalo de tolerância (IT), obtidas durante os ensaios curtos de maquinagem do aço inoxidável AISI 316, com a ferramenta de corte M25 (revestida e com quebra-apara) (Tabela 6.4, Tabela 6.5 e Tabela 6.13, em anexo).

A Figura 4.7 mostra as superfícies maquinadas obtidas nos ensaios de corte curtos, a seco e com fluido de corte, do aço inoxidável AISI 316, com a ferramenta de corte M25 (revestida e com quebra-apara).

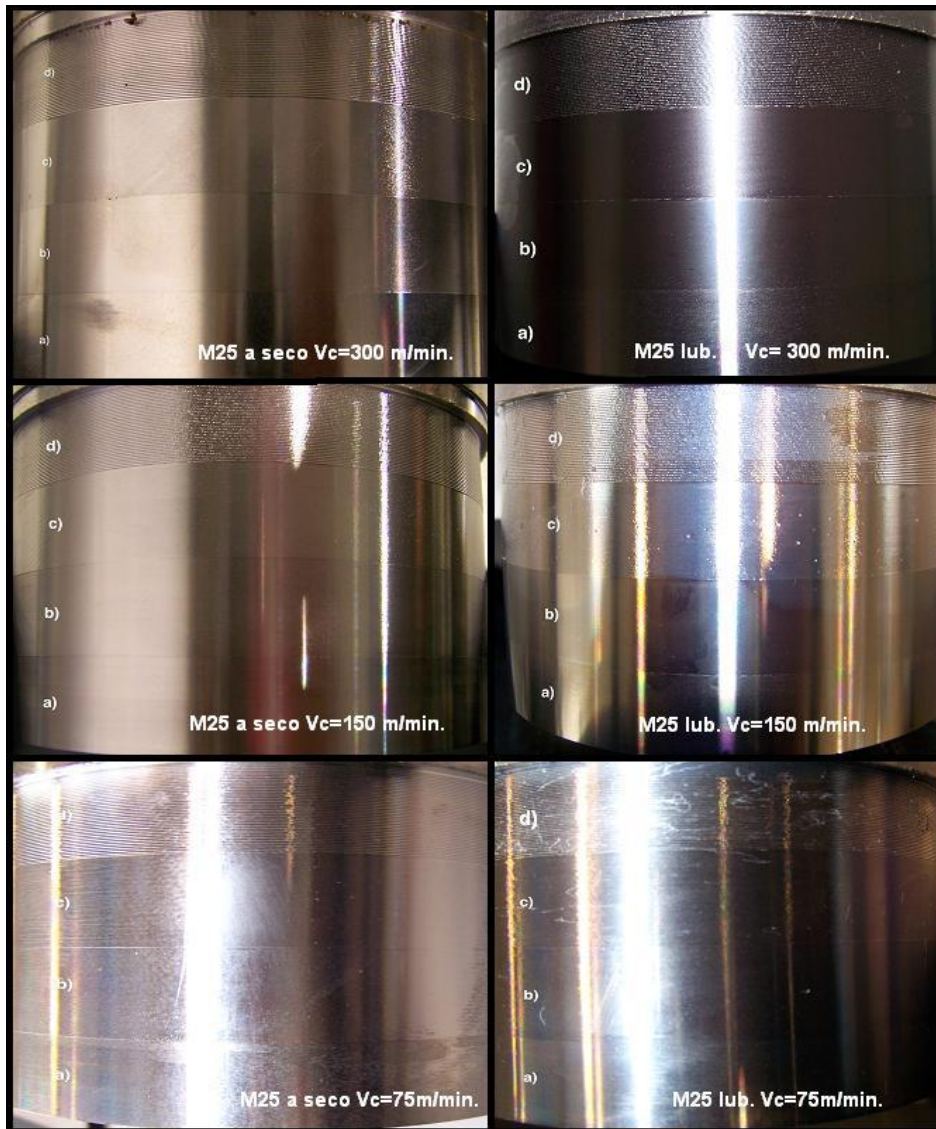


Figura 4.7 – Superfícies maquinadas obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta M25; a) $a=0,05$ mm/rot. ; b) $=0,1$ mm/rot.; c) $=0,2$ mm/rot.; d) $=0,4$ mm/rot.

Pela análise da Figura 4.7, nota-se que em todos os ensaios efetuados, quer em regime a seco como com fluido de corte, a integridade de superfície é fortemente afetada pelo aumento do avanço, ou seja, obteve-se superfícies maquinadas com pior rugosidade quando foram usados avanços maiores. Notou-se também que a maquinagem com lubrificação proporcionou melhores acabamentos de superfície do que na maquinagem a seco.

A Figura 4.8 mostra a evolução da rugosidade média aritmética (R_a) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara), na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 e a curva teórica da rugosidade aritmética (R_{ta}) – equação 7.

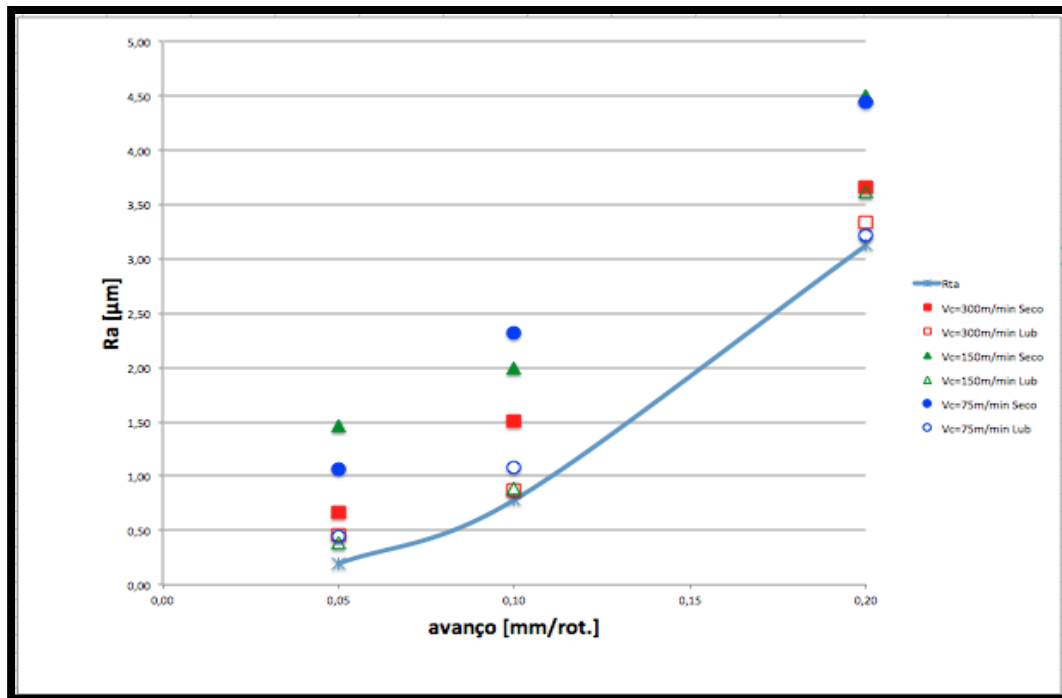


Figura 4.8 – Evolução da rugosidade média aritmética (Ra) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta M25.

Pela observação da Figura 4.8, nota-se que a rugosidade média aritmética (Ra) aumenta com o aumento do avanço (a) como seria de esperar. Obtém-se valores de rugosidade média aritmética (Ra) mais baixos com o uso de fluido de corte em comparação aos ensaios a seco para todas as velocidades de corte usadas nos ensaios. Todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais apresentam um valor superior ao valor teórico da rugosidade aritmética (Rta).

A Figura 4.9 mostra a evolução da rugosidade máxima (Rt) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara), na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 e a curva teórica da rugosidade máxima (Rtt) – equação 6.

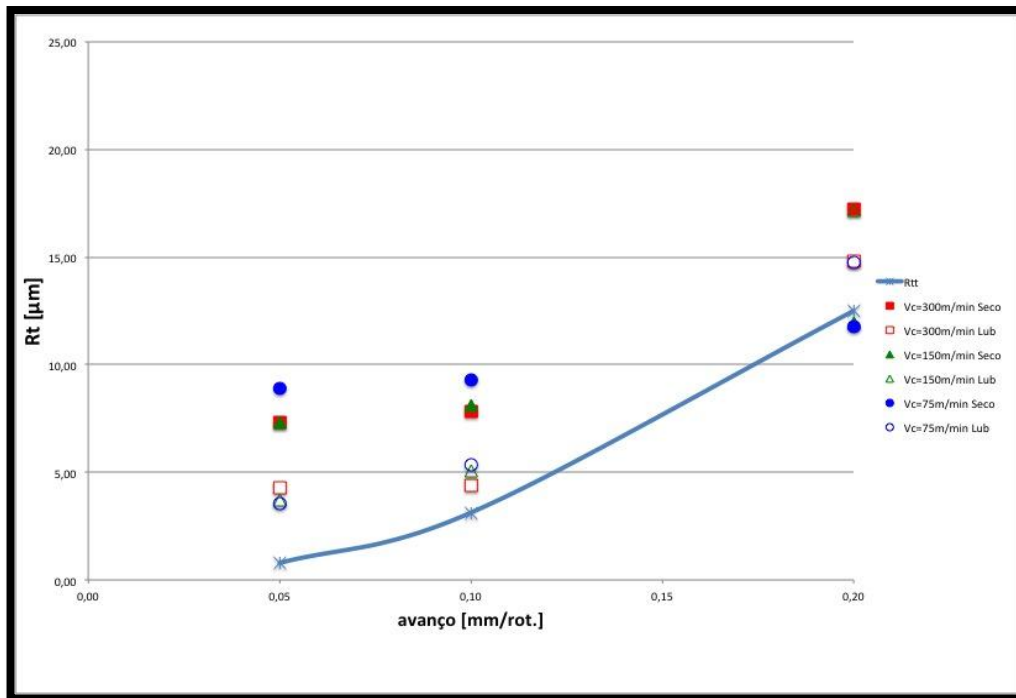


Figura 4.9 - Evolução da rugosidade máxima (Rt) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta M25.

Analisando a Figura 4.9, verifica-se que a rugosidade máxima (Rt) aumenta com o aumento do avanço (a). Obtém-se, de uma maneira geral, valores de rugosidade máxima (Rt) mais baixos com o uso de fluidos de corte em comparação aos ensaios a seco. Todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais apresentam valor superior ao valor teórico, exceto para o ensaio a seco com a $V_c=75$ m/min e o $a=0,2$ mm/rot.

A Figura 4.10 mostra a evolução de IT em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com lubrificação, com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara), na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 – equação 8. No mesmo gráfico representa-se os valores de IT normalizados recomendados pela literatura para o torneamento geral (IT7 à IT11) e para torneamento para acabamento (IT5 à IT7) (Figura 6.2, em anexo), afim de averiguar se os valores de IT calculados se encontram dentro da gama de IT normalizado (Tabela 6.12, em anexo) recomendado pela literatura e, avaliar a precisão dimensional encontrada.

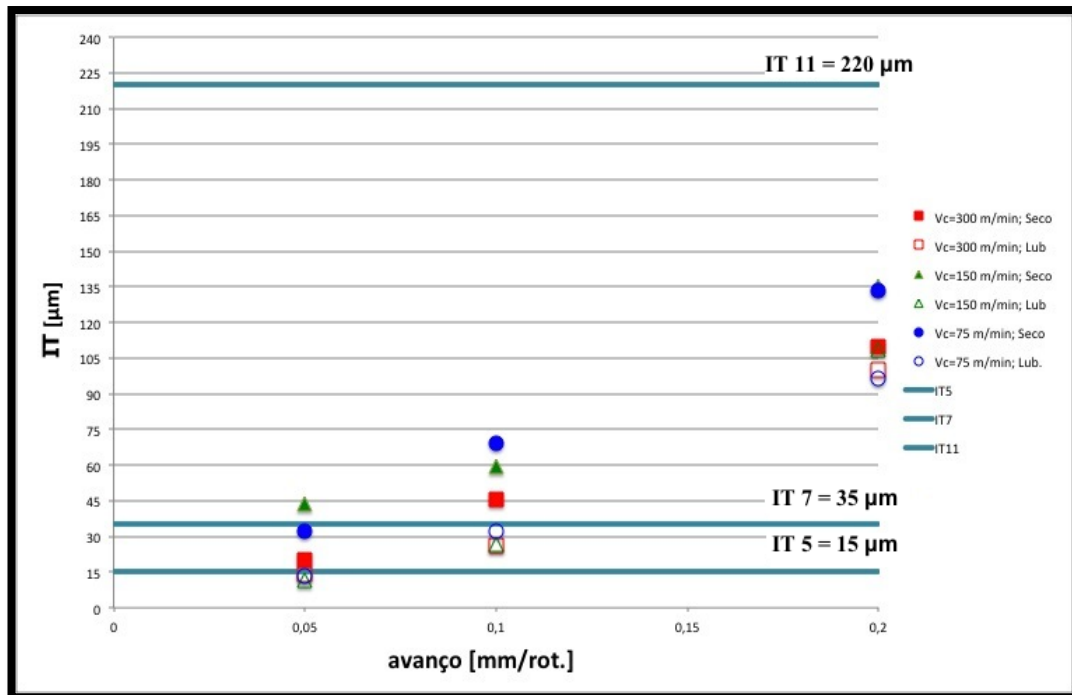


Figura 4.10 – Evolução de IT em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta M25.

Pela análise da Figura 4.10 verifica-se que os valores de IT aumentam com o aumento do avanço para todas as velocidades de corte, tanto para os ensaios a seco como para os ensaios com fluido de corte.

De uma maneira geral, foram alcançados valores de IT mais baixos para os ensaios com fluido de corte do que nos ensaios a seco.

As superfícies obtidas apresentam valores de IT entre 15 e 220 μm, ou seja, é possível obter qualidade superficial de construção mecânica de grande precisão (IT5 e IT6), usando baixos avanços e qualidade superficial de construção mecânica corrente (IT11), usando avanços maiores.

É possível constatar que, com os parâmetros de corte usados, foram obtidos valores de IT dentro da gama de IT normalizados indicados para o torneamento geral (IT7 à IT11). Alguns dos IT calculados apresentam valores dentro da gama de IT indicados para torneamento para acabamento (IT5 à IT7), o que significa que foram obtidas superfícies maquinadas com elevada precisão dimensional.

4.1.2.2 Integridade superficial/precisão dimensional obtida com a Ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) na maquinagem a seco e com fluido de corte

Nesta secção, serão apresentados os resultados de acabamento de superfície, nomeadamente as superfícies maquinadas, os parâmetros da rugosidade e os gráficos de intervalos de tolerância (IT), obtidas durante os ensaios curtos de maquinagem do aço inoxidável AISI 316, com a ferramenta de corte P25 (sem revestimento e com quebra-apara) (Tabela 6.6, Tabela 6.7 e Tabela 6.14 em anexo).

A Figura 4.11 mostra as superfícies maquinadas obtidas nos ensaios de corte curtos, a seco e com fluido de corte, do aço inoxidável AISI 316, com a ferramenta de corte P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

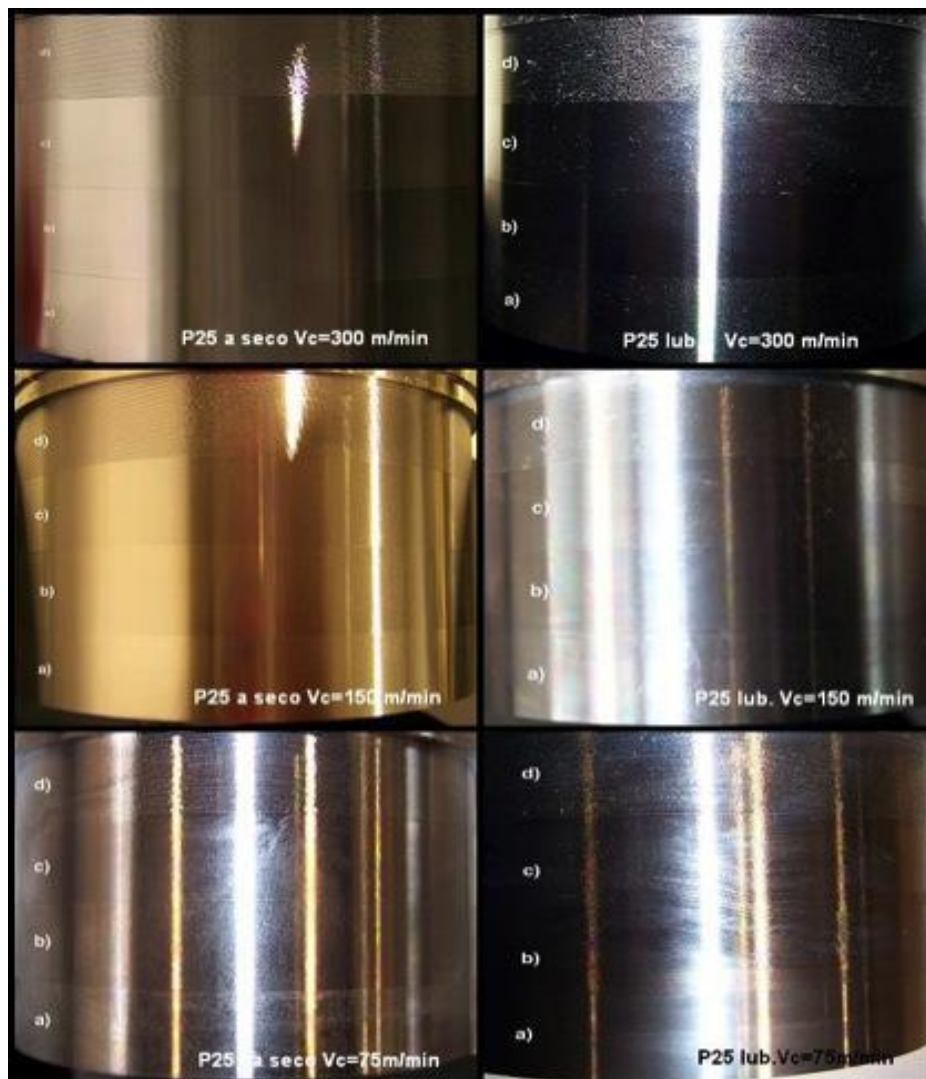


Figura 4.11 – Superfícies maquinadas obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta P25; a) a=0,05 mm/rot.; b) =0,1 mm/rot.; c) =0,2 mm/rot.; d) =0,4 mm/rot.

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Da Figura 4.11 é possível concluir que em todas os ensaios de corte efetuados, quer a regime a seco como com fluido de corte, a integridade de superfície é fortemente afetada com o aumento do avanço, ou seja, obteve-se superfícies maquinadas com pior rugosidade quando foram usados avanços maiores. Foram obtidos melhores acabamentos de superfícies na maquinação com fluido de corte.

A Figura 4.12 apresenta a evolução da rugosidade média aritmética (R_a) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a pastilha P25 (sem revestimento e com quebra-apara), na maquinação do aço inoxidável AISI 316 e a curva teórica da rugosidade aritmética (R_{ta}) – equação 7.

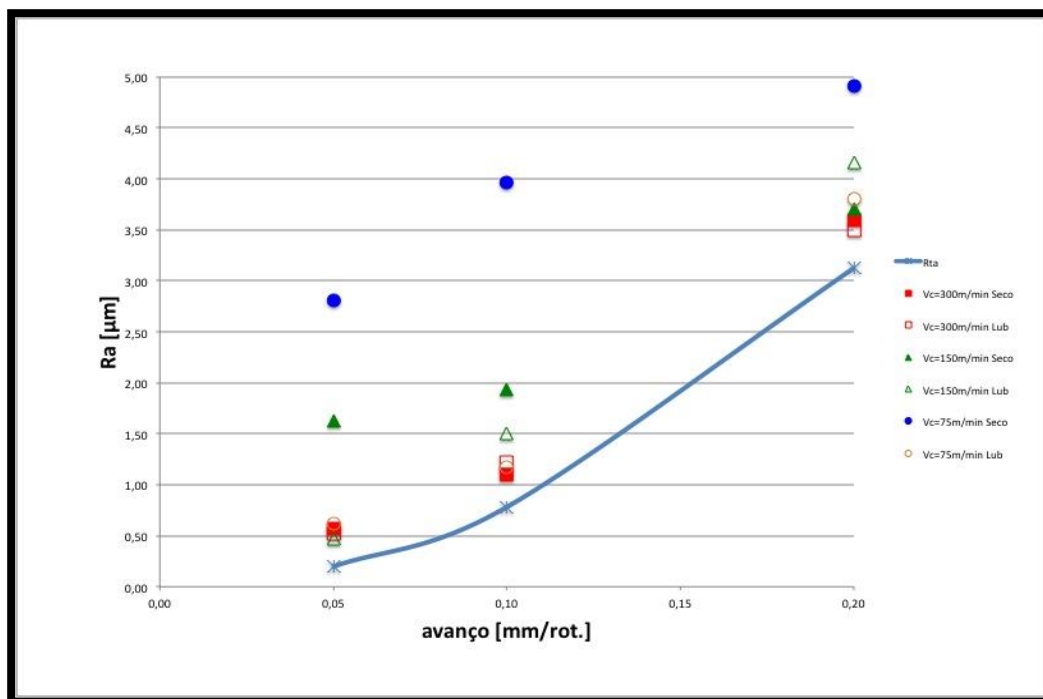


Figura 4.12 - Evolução da rugosidade média aritmética (R_a) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta P25.

Examinando a Figura 4.12, nota-se que a rugosidade média aritmética (R_a) aumenta com o aumento do avanço (a) tanto nos ensaios a seco como ensaios com fluido de corte, como seria de esperar. Os valores de R_a obtidos nos ensaios a seco são muito elevados e são superiores valores de R_a obtidos nos ensaios com fluido de corte. Todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais apresentam valores superiores ao valor teórico (R_{ta}).

A Figura 4.13 mostra a evolução da rugosidade máxima (R_t) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido

de corte, com a ferramenta P25 (sem revestimento e sem quebra-apara), na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 e a curva teórica da rugosidade máxima (R_{tt}) – equação 6.

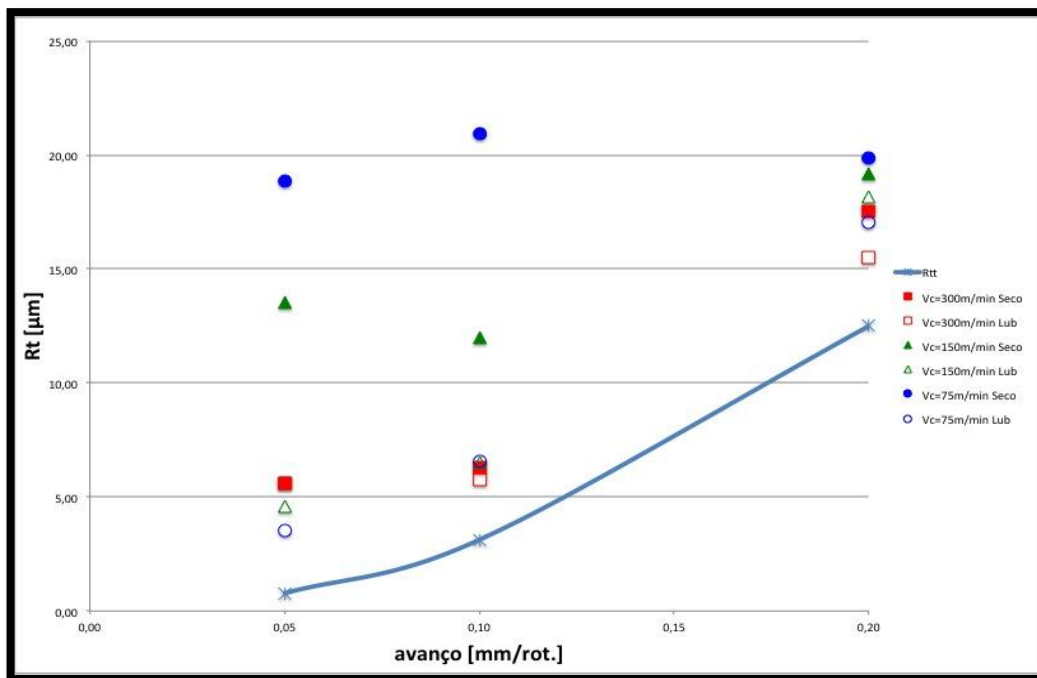


Figura 4.13 – Evolução da rugosidade máxima (R_t) em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta P25.

Observando a Figura 4.13, verifica-se que a rugosidade máxima (R_t) aumenta com o aumento do avanço (a). Obtém-se, em geral, valores de rugosidade máxima (R_t) mais baixos com o uso de fluido de corte em comparação aos ensaios a seco. Todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais apresentam valores superiores ao valor teórico. Os valores de rugosidade máxima (R_t) obtidos nos ensaios a seco para as velocidades de corte 75 e 150 m/min são muito superiores aos valores de rugosidade máxima (R_t) obtidos nos ensaios com fluido de corte.

A Figura 4.14 mostra a evolução de IT em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara), na maquinagem do aço inoxidável AISI 316 – equação 8. No mesmo gráfico representa-se os valores de IT normalizados recomendados pela literatura para o torneamento geral (IT7 à IT11) e para torneamento para acabamento (IT5 à IT7) (Figura 6.2, em anexo), afim de averiguar se os valores de IT calculados se encontram dentro da gama de IT normalizado (Tabela 6.12, em anexo) recomendado pela literatura e, avaliar a precisão dimensional encontrada.

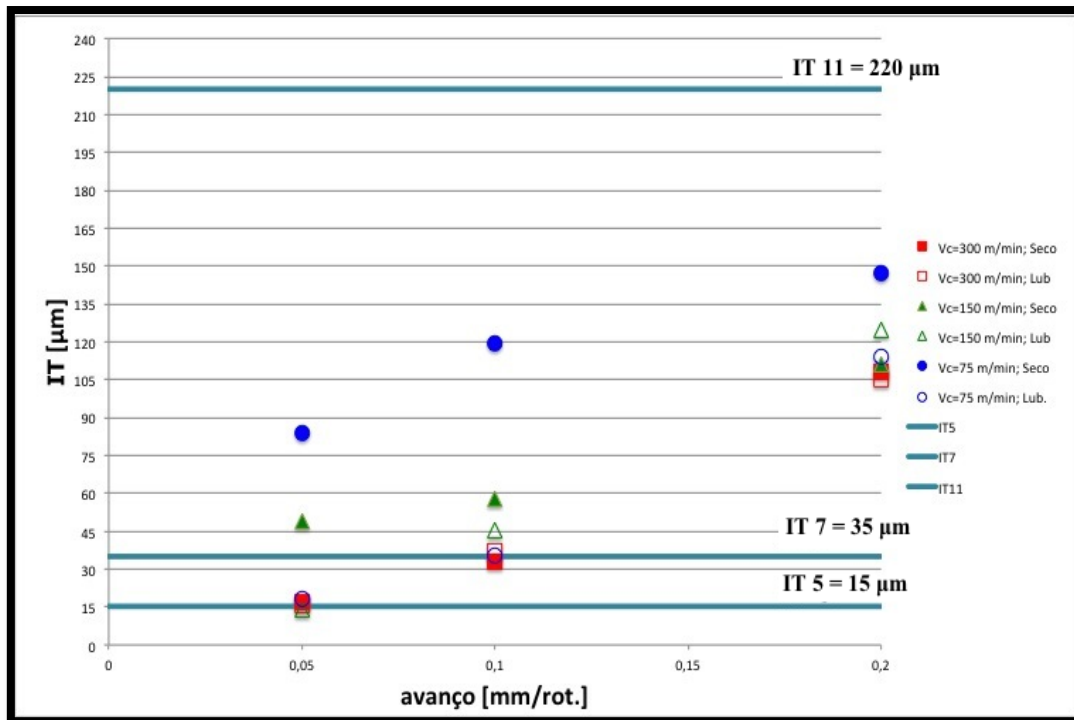


Figura 4.14 – Evolução de IT em função do avanço (a) para diferentes velocidades de corte obtidas nos ensaios de corte curtos a seco e com fluido de corte, com a ferramenta P25.

Analisando da Figura 4.14 pode-se confirmar que os valores de IT aumentam com o aumento do avanço para todas as velocidades de corte e tanto para os ensaios a seco como para os ensaios com fluidos de corte.

As superfícies obtidas apresentam valores de IT entre 15 e 220 μm , isto é, é possível obter qualidade superficial de construção mecânica de grande precisão (IT5 e IT6), usando baixos avanços e qualidade superficial de construção mecânica corrente (IT11), usando avanços maiores.

Na maquinagem a seco, o valor de IT diminui com o aumento da velocidade de corte.

Foram obtidos valores de IT mais baixos para os ensaios com fluido de corte do que nos ensaios a seco.

Com os parâmetros de corte usados, foram obtidos valores de IT dentro da gama de IT normalizados indicados para o torneamento geral (IT7 à IT11). Alguns dos IT calculados apresentam valores dentro da gama de IT indicados para torneamento para acabamento (IT5 à IT7), ou seja, foram obtidas superfícies maquinadas com precisão dimensional elevada.

4.2 Análise de maquinabilidade do aço inoxidável AISI 316 (ensaios de corte longos)

A análise da maquinabilidade dos ensaios de corte longos passou por determinar a evolução do acabamento da superfície das peças (R_a e R_t) (Tabela 6.8 à Tabela 6.11), do desgaste (VB) na ferramenta (Tabela 6.8 à Tabela 6.11) e análise das aparas obtidas, fazendo uma comparação do desempenho das ferramentas M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara), na maquinagem a seco do aço AISI 316.

Foram efetuados ensaios de corte longos de maquinagem usando dois tipos de materiais de ferramenta (M25 e P25) em pastilhas com igual geometria. Utilizou-se duas velocidades de corte diferentes (75 e 300m/min), o avanço e a profundidade de corte foram mantidas constantes e iguais a 0,1 mm/rot. e 2mm, respetivamente.

4.2.1 Forma de aparas obtidas

As aparas obtidas com os ensaios longos foram do tipo 6.1 (em arco, ligado) e 6.2 (em arco fragmentado) segundo a norma **ISO 3685/1993**.

Na Figura 4.15 pode observar-se exemplos de forma de aparas obtidas nos ensaios de corte longos para as duas ferramentas de corte, M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara), para as duas velocidades de cortes (300 e 75 m/min).

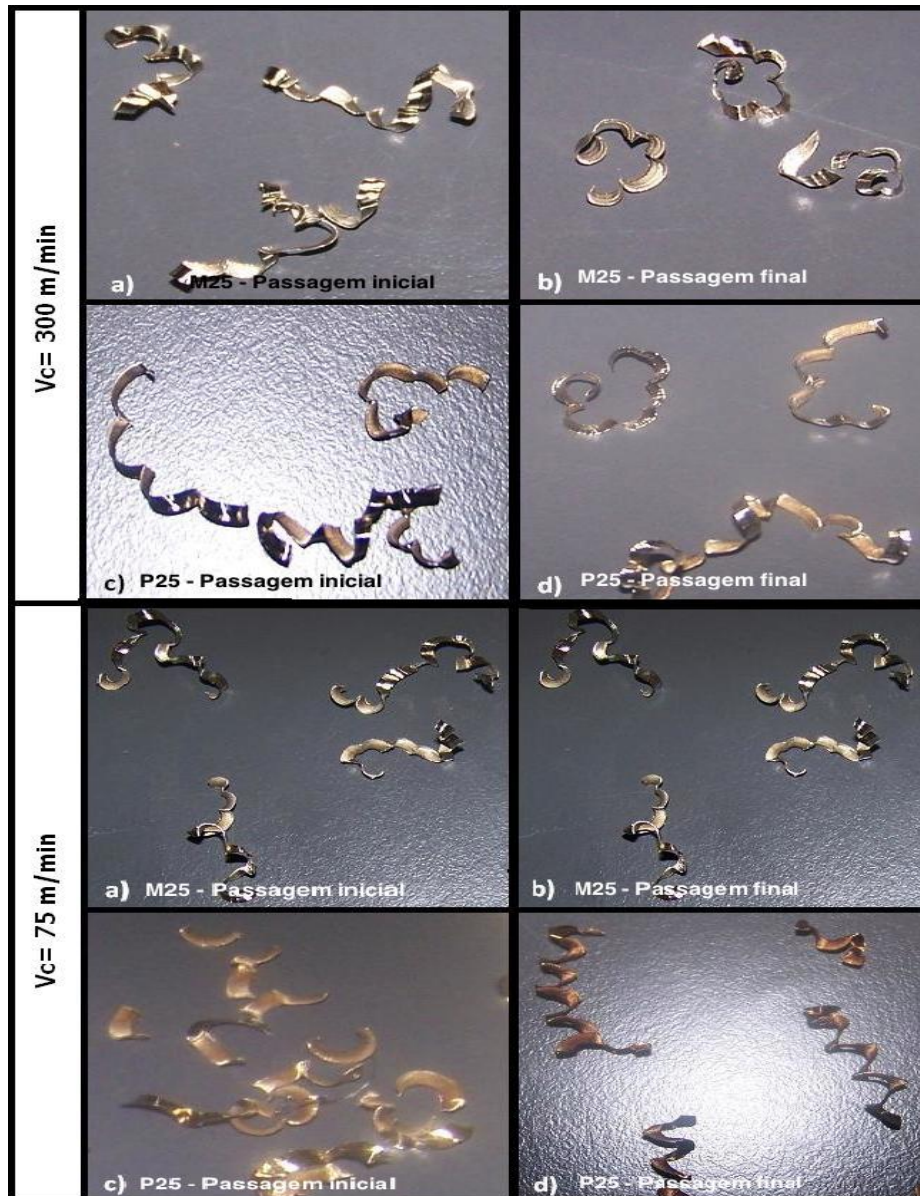


Figura 4.15 – Aparas obtidas (1,5X) nos ensaios longos, com $V_c=300$ m/min e $V_c=75$ m/min, $p=2$ mm e $a=0,05$ mm/rot., a) M25 passagem inicial; b) M25 passagem final; c) P25 passagem inicial; d) P25 passagem final.

Como se pode constatar na Figura 4.15, para a $V_c=300$ m/min, tanto para a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) como para P25 (sem revestimento e com quebra-apara), foram obtidas aparas do tipo 6.1 (em arco ligado).

Para a $V_c=75$ m/min, para a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) foram obtidas sempre aparas do tipo 6.1 (em arco ligado), já para a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) as aparas obtidas foram alternando do tipo 6.1 (em arco ligado) para o tipo 6.2 (em arco fragmentado) com o aumento das passagens.

4.2.2 Integridade superficial

Nesta secção serão apresentados os resultados de acabamento de superfície, mais concretamente os parâmetros de rugosidade e as superfícies maquinadas obtidas durante os ensaios de corte longos do aço inoxidável AISI 316, com as ferramentas M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara) para duas velocidades de cortes diferentes (75 e 300 m/min).

A Figura 4.16 mostra as superfícies maquinadas obtidas nos ensaios de corte longos do aço inoxidável AISI 316, com as ferramentas M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara) para a $V_c=300$ m/min e $V_c=75$ m/min.

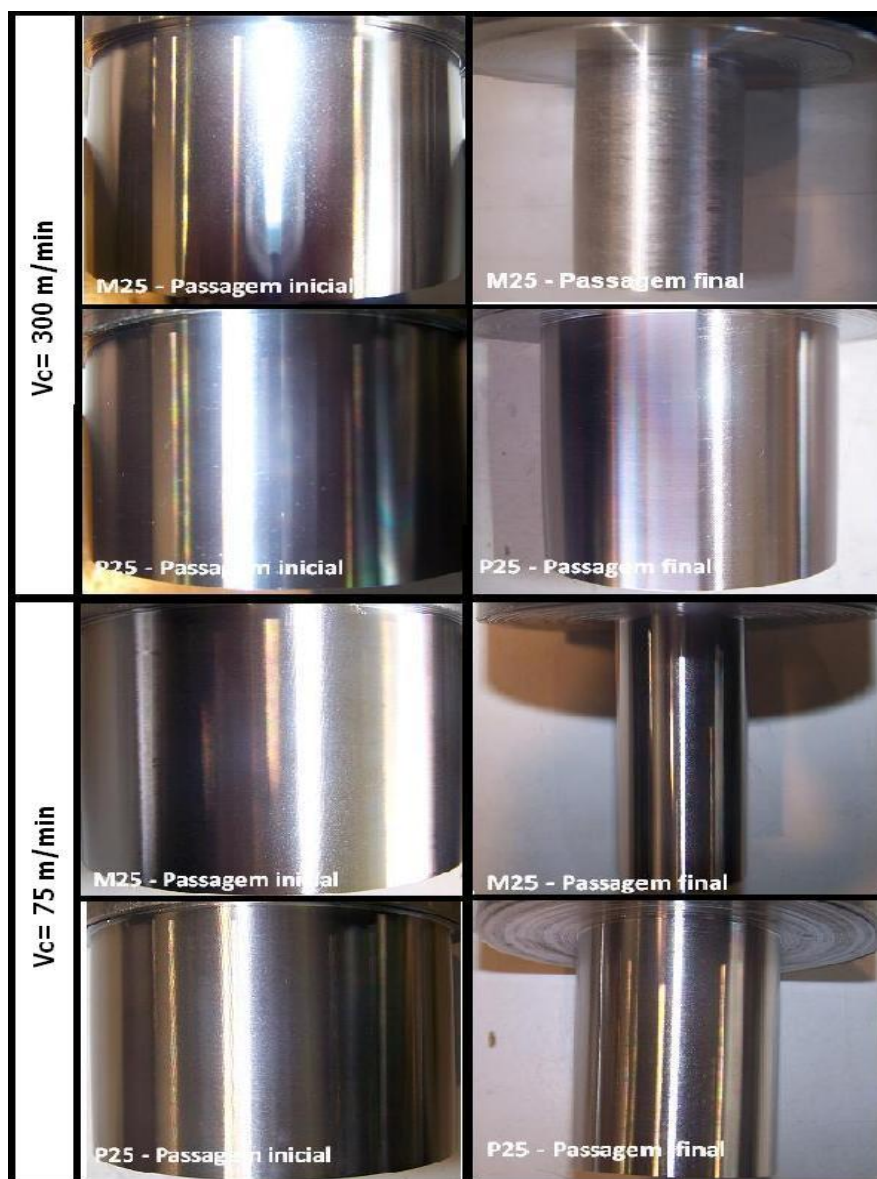


Figura 4.16 – Superfícies maquinadas obtidas nos ensaios longos, com $V_c=300$ m/min e $V_c=75$ m/min, $p=2$ mm e $a=0,05$ mm/rot., a) M25 passagem inicial; b) M25 passagem final; c) P25 passagem inicial; d) P25 passagem final.

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Analisando a Figura 4.16 verifica-se que para a $V_c=300$ m/min, para a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) as superfícies maquinadas permanecem praticamente inalteradas, independentemente do aumento do número de passagens e do tempo de corte, mas para a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) há uma alteração da superfície na passagem final. A superfície torna-se mais áspera e rugosa.

Para a $V_c=75$ m/min, verifica-se que as superfícies maquinadas permanecem praticamente inalteradas com o aumento do números de passagens e com tempo de corte, para ambas as pastilhas de corte usadas.

A Figura 4.17 apresenta a evolução da rugosidade média aritmética (Ra) em função do tempo de corte na maquinagem a seco do aço inoxidável AISI 316 para duas ferramentas de corte (M25 e P25) e para as velocidades de corte de 300 m/min. (Figura 4.17 a)) e 75 m/min. (Figura 4.17b)).

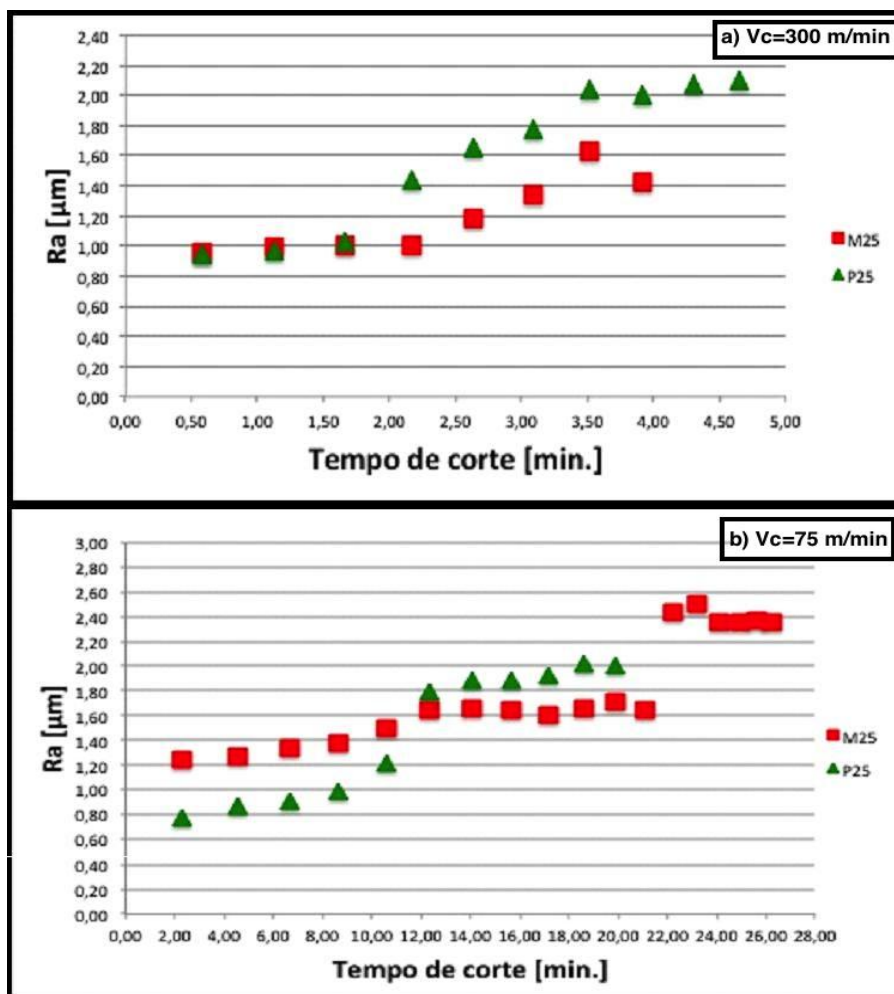


Figura 4.17 – Evolução da rugosidade média aritmética (Ra) em função do tempo de corte obtidas nos ensaios longos a seco, com as ferramentas M25 e P25 e com: a) $V_c=300$ m/min. e b) $V_c=75$ m/min.

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Analisando a Figura 4.17 verifica-se um aumento substancial dos valores da rugosidade média aritmética (R_a) com o aumento do tempo de corte, para as duas ferramentas de corte e para ambas as velocidades de corte.

Para a $V_c=300$ m/min, verificou-se que os valores de R_a obtidos nos ensaios com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) são ligeiramente inferiores aos obtidos com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

Para a $V_c=75$ m/min, nota-se diferentes comportamentos dos valores de R_a , com o aumento do tempo de corte. inicialmente, os valores de R_a obtidos na maquinagem com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) são ligeiramente superiores aos obtidos com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara). Para um tempo de corte aproximadamente 11 minutos, esta tendência altera-se, ou seja, os valores de R_a obtidas na maquinagem com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) passam a ser superiores da ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara).

A Figura 4.18 mostra a evolução da rugosidade máxima (R_t) em função do tempo de corte na maquinagem a seco do aço inoxidável AISI 316 para duas ferramentas (M25 e P25) e para as velocidades de corte de 300 m/min. (Figura 4.18a) e 75 m/min. (Figura 4.18b)).

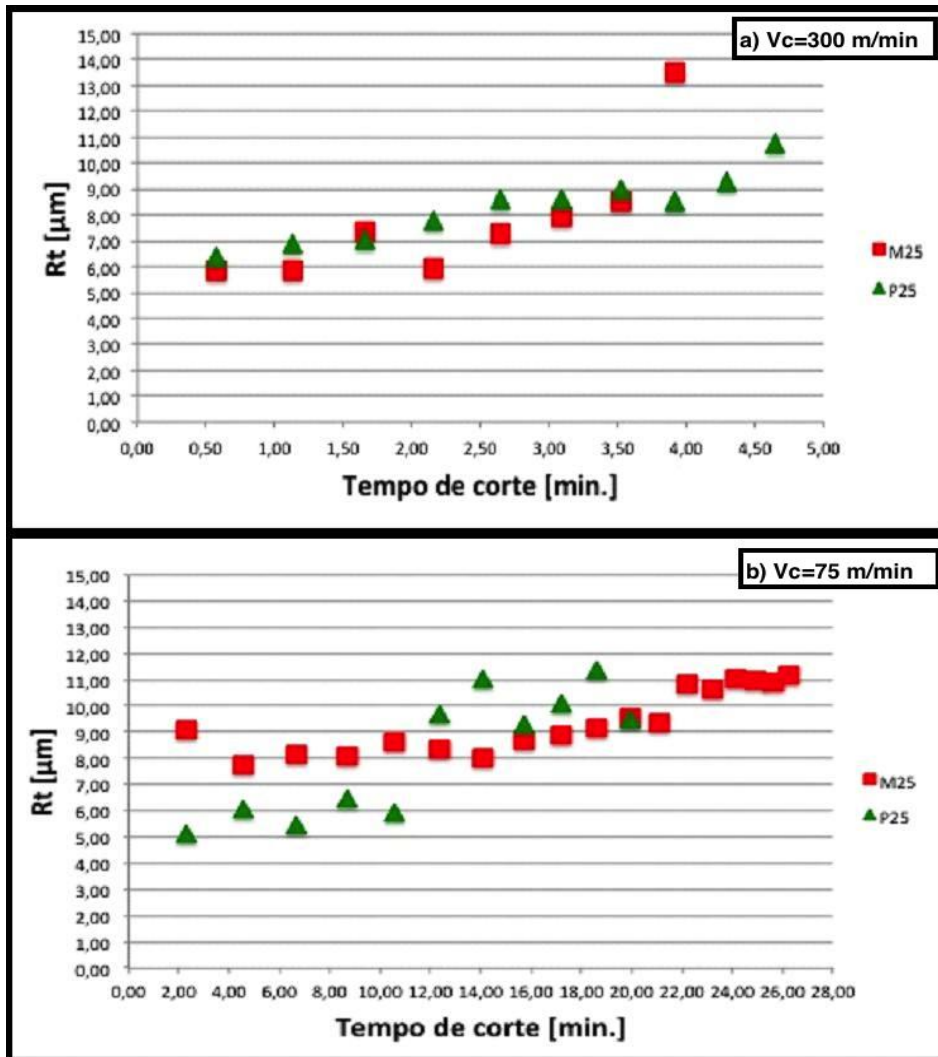


Figura 4.18 – Evolução da rugosidade máxima (Rt) em função do tempo de corte obtidas nos ensaios longos a seco, com as pastilhas M25 e P25 e com: a) Vc=300 m/min. e b) Vc=75 m/min..

Pela análise da Figura 4.18 nota-se os valores de Rt aumentam com o aumento do tempo de corte para as duas ferramentas de corte e para ambas as velocidades de corte.

Para a Vc=300 m/min, verificou-se que os valores de Rt obtidos nos ensaios com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) são ligeiramente inferiores aos obtidos com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara), exceto para a ultima passagem, onde a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) obteve um valor de Rt superior ao da ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

Para a Vc=75 m/min, comparando os valores de Rt para as duas ferramentas de corte, notam-se diferentes comportamentos, com o aumento do tempo de corte. Inicialmente, os valores de Rt obtidos com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) são ligeiramente inferiores aos obtidos com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara). Para um tempo de corte de sensivelmente 12 minutos, os valores de Rt obtidas na

maquinagem com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) passam a ser superiores aos os da ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara).

4.2.3 Desgaste e vida da ferramenta de corte

O desgaste da ferramenta de corte foi medido na face de ataque e na face de saída. O critério de interrupção dos ensaios, segundo a norma **ISO 3685/1993**, foi de um limite máximo de 0,25 mm de desgaste na face de saída, ou seja, um $VB=0,25\text{mm}$.

A Figura 4.19 apresenta a evolução do desgaste (VB) em função do tempo de corte na maquinagem a seco do aço inoxidável AISI 316 para duas ferramentas de corte, nomeadamente M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara) e para as velocidades de corte de 300 m/min. (Figura 4.19a)) e 75 m/min. (Figura 4.19b)).

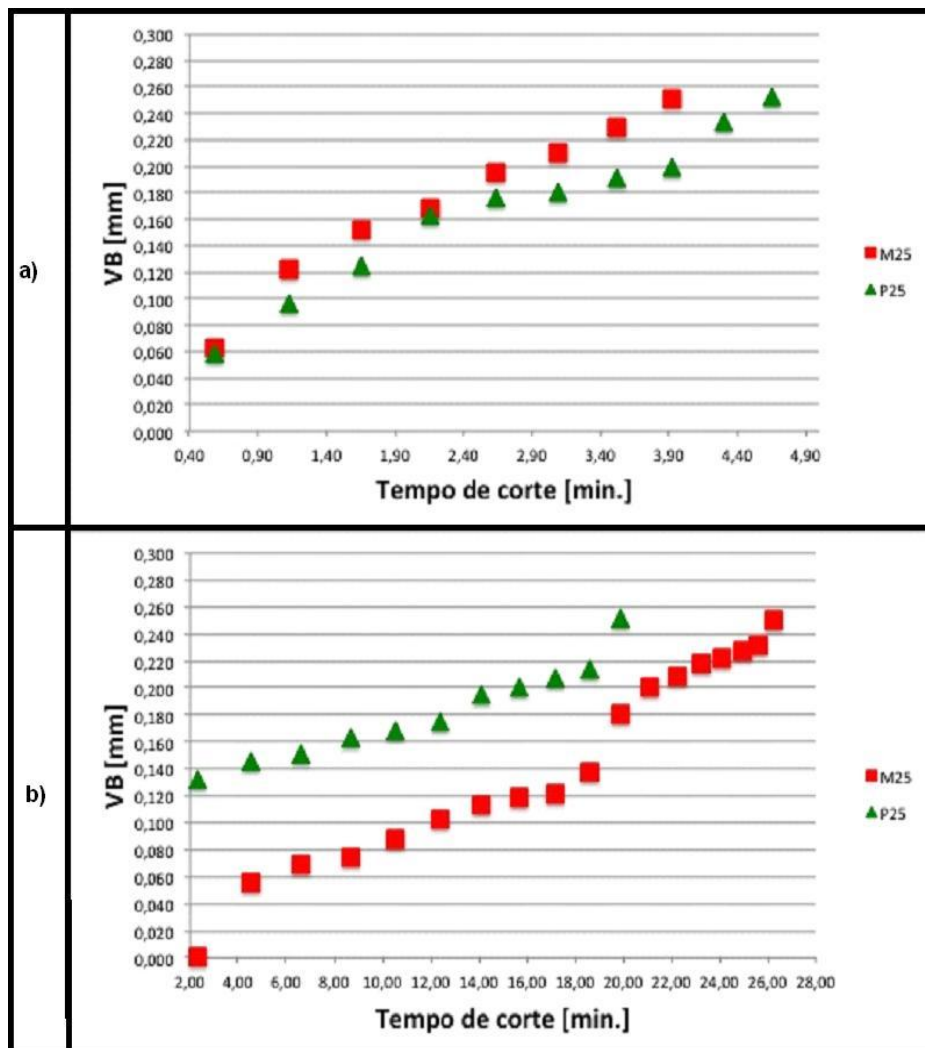


Figura 4.19 – Evolução do desgaste (VB) em função do tempo de corte; um $a=0,1\text{ mm/rot.}$, um $p=2\text{ mm.}$; a) $V_c=300\text{ m/min.}$; b) $V_c=75\text{ m/min.}$

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Observando a Figura 4.19 pode se constatar que o desgaste aumenta com o aumento do tempo de corte para ambas as ferramentas de corte e para as duas velocidades de corte.

Para a $V_c=300$ m/min, a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) atingiu o critério de paragem ($VB=0,25$ mm) em menos passagens do que a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

Para a $V_c=75$ m/min, a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) atingiu o critério de paragem ($VB=0,25$ mm) em menos passagens do que a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara).

A Figura 4.20 apresenta o aspecto final das faces de ataque e de saída das ferramentas de corte M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara), resultantes dos ensaios de corte longos sem lubrificação, para as velocidades de corte de 300 m/min. (Figura 4.20a) e 75 m/min. (Figura 4.20b)).

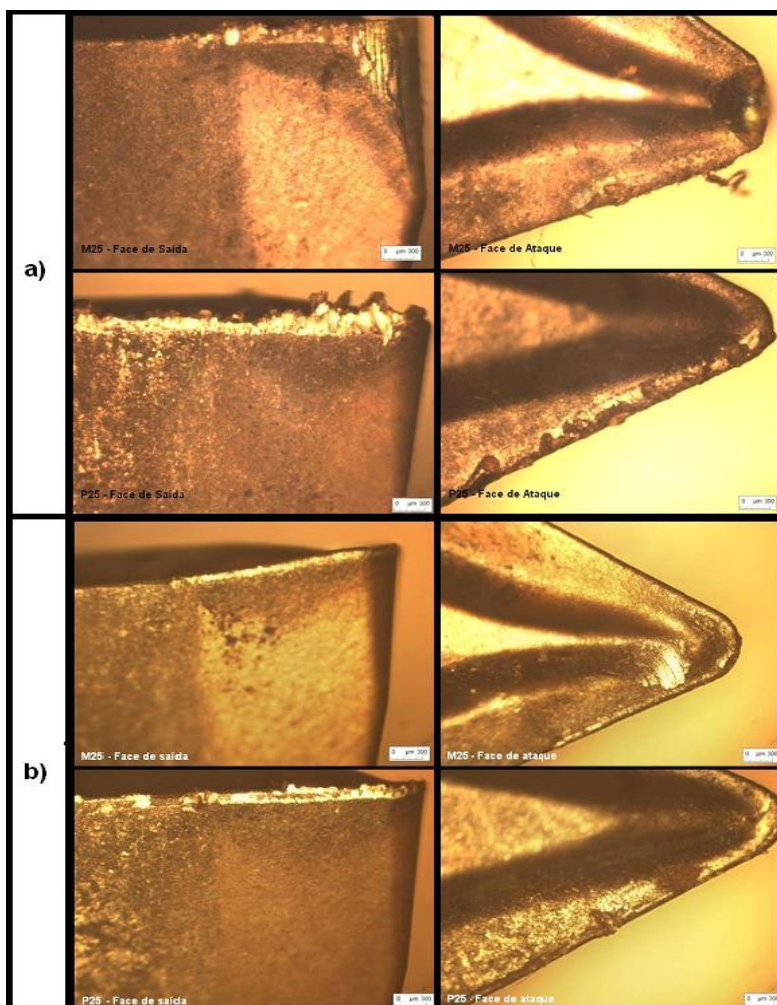


Figura 4.20 – Desgaste da ferramenta observado (5X) no microscópio NIKON ECLIPSE LV 150 para um $a=0.1$ mm/rot. e um $p=2$ mm; a) $V_c=300$ m/min; b) $V_c=75$ m/min.

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Na Figura 4.20 pode-se constatar que para a $V_c=300$ m/min, a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) teve maior desgaste do que a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara), tanto na face de ataque como na face de saída. A ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) teve um desgaste mais elevado no bico do que no flanco.

No caso da $V_c=75$ m/min, pode-se ver que há maior desgaste, tanto na face de ataque como na face de saída, na ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) do que na ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara).

De referir que para as duas velocidades de corte usadas, constatou-se uma aderência do material maquinado e uma oxidação tanto na ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara) como na ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

Durante os ensaios efetuados, foram adquiridos dados que permitiram determinar a curva de vida das ferramentas de cortes usados. Os resultados obtidos nos ensaios para a elaboração da curva de vida da ferramenta encontram-se representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 — Tempo de Vida das Ferramentas de corte usadas nos ensaios.

Ferramenta	V_c [m/min]	T [min]
M25 (revestida e com quebra-apara)	300	3,92
	75	26,24
P25 (sem revestimento e com quebra-apara)	300	4,65
	75	19,91

Na Figura 4.21 apresenta-se a curva de vida das ferramentas M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara), determinadas para o intervalo de velocidades utilizado nos ensaios.

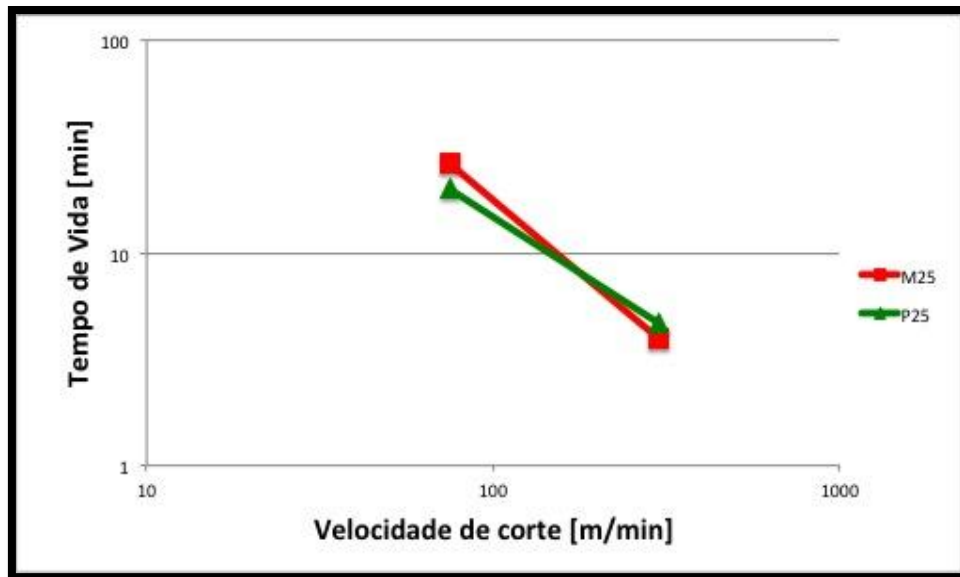


Figura 4.21 – Curva de Vida das Ferramentas de corte M25 e P25 para ensaios de corte a seco.

É possível perceber, ao analisar a Figura 4.21, que a vida da ferramenta sofre, como já descrito na literatura, grande influência da V_c , em função do tempo de vida da ferramenta. Esta sofre uma redução com o aumento do valor da V_c . Portanto, a curva de vida da ferramenta, para o material testado, foi obtida com sucesso.

Através dos dados da Tabela 4.2 foi possível chegar a equação de Taylor para a Vida da ferramenta (equação 5), para as duas ferramentas de corte usadas nos ensaios. Na Tabela 4.3 apresenta-se os valores das constantes n e C da equação de Taylor obtidos através da resolução da equação 5.

Tabela 4.3 – Valores das constantes de Taylor, obtidos para as Ferramentas M25 e P25

Ferramenta	n	C
M25 (revestida e com quebra-apara)	0,7292	812,40
P25 (sem revestimento e com quebra-apara)	0,9532	1298,18

Assim sendo, a equação de Taylor para M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara) é dada pela equação 8 e equação 9, respetivamente.

$$V_c T^{0,7292} = 812,40 \quad (9)$$

$$V_c T^{0,9532} = 1298,18 \quad (10)$$

5 Considerações Finais

5.1 Conclusões gerais

Os testes de torneamento foram realizados em aço inoxidável AISI 316 usando duas ferramentas de corte de carboneto sinterizado: M25 (revestida e com quebra-apara) e P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

Numa primeira fase foi avaliado o acabamento da superfície da peça maquinada e a forma das aparas obtidas, recorrendo aos ensaios de corte curtos.

Na segunda fase foi avaliado o desgaste das ferramentas de corte (VB) e a forma das aparas obtidas, recorrendo aos ensaios de corte longos e obtida a curva de vida segundo o modelo de Taylor.

Em ambas as fases, foram verificados qual o efeito dos parâmetros de corte (avanço e velocidade de corte) e do revestimento da ferramenta, na qualidade da superfície obtida. Nos ensaios de corte curtos foi ainda analisado o efeito do uso de fluido de corte na maquinagem. Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

Ensaio de corte curtos:

- O avanço é o parâmetro mais influente na obtenção da forma da apara obtida. Foram obtidas aparas curtas e fragmentadas com o aumento do avanço.
- A rugosidade da superfície maquinada é fortemente afetada pelo aumento do avanço. O aumento do avanço provoca um aumento da rugosidade. Foi possível obter superfícies com elevada precisão dimensional, com intervalos de tolerância dentro da gama sugerido para o torneamento geral (IT 7 à IT 11) e torneamento para acabamento (IT5 à IT7) do aço inoxidável AISI 316 com o diâmetro usado nos ensaios.
- O uso de fluido de corte permite a obtenção de superfícies com melhores acabamentos.

Ensaio de corte longos:

- Foram obtidas aparas em arco com a velocidade de corte de 300 m/min para ambas as Ferramentas de corte.
- A ferramenta de corte M25 (revestida e com quebra-apara) para $V_c=300$ m/min, apresenta melhores valores de R_a .
- Foi obtido maior tempo de vida para a ferramenta de corte M25 (revestida e com quebra-apara), para a velocidade de corte de 75 m/min.
- O revestimento (TiCN/Al₂O₃/TiC) da ferramenta M25, revelou-se como sendo interessante para a maquinagem do aço inoxidável AISI 316, pois consegue-se obter superfícies maquinadas com bom acabamento superficial, aparas curtas, maior resistência ao desgaste. Com o uso desta ferramenta revestida, consegue-se evitar o uso de fluidos de corte que, por conseguinte, evitar poluição, proporcionando uma maquinagem amiga do ambiente.

5.2 Trabalhos futuros

No universo em que este trabalho está inserido, novos desafios e desenvolvimentos se colocam continuamente.

Após a investigação efetuada da maquinagem do aço inoxidável AISI 316, propõem-se alguns tópicos de trabalhos que poderiam ser efetuados no futuro:

- Utilização de outras ferramentas de corte. Nomeadamente ferramentas com outro tipo de revestimento e com outras geometrias;
- Medição de forças e potência de corte e das temperaturas de corte;
- Medição de tensões residuais e camada transformada para avaliar a integridade superficial;
- Realização de ensaios em maquinagem a alta velocidade, para avaliar o desempenho da ferramenta revestida;
- Realização de simulações numéricas com os mesmos parâmetros de corte testados neste trabalho, afim de fazer comparação entre os resultados experimentais e os resultados simulados.

Referências Bibliográficas

Abouelatta, O.B., Mádl, J., “*Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations*”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 118, pp. 269 – 277, 2001.

Abrão, A. M., Aspinwall, D. K., “*Temperature evaluation when machining hardened hot work die steel using PCBN tooling*”, *Industrial Diamond Review*, Volume 56, n.2, pag. 40-44, 1996.

Amorim, J. H., “*Estudo da relação entre a velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e orças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro*”, Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ASM Handbook, “*Metallography and Microstructures*”, ASM International, Vol. 9, ninth edition, USA, 273-278, 1992.

ASM, “*Stainless Steels, ASM Specialty Handbook*”, ASM, 1994.

Astakhov V.P. et. Davim J.P., “*Tools (Geometry and Material) and Tool Wear*”, Chapter 2, (29-57) in *Davim, J.P. (Ed.)*, *Machining: Fundamentals and Recent*, Springer, London, 2008.

Astakhov, V. P., “*Tribology of metal cutting*”, Great Britain: Elsevier, 2006.

B. Dilip Jerold & M. Pradeep Kumar, “*Machining of AISI 316 Stainless Steel under Carbon-Dioxide Cooling*”, *Materials and Manufacturing Processes*, 27:10, 1059-1065, 2012.

Boothroyd, D., Knight, W. A., “*Fundamentals of machining and machine tools*”, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1989.

Cangundo, E. M., “*Avaliação experimental da condição tribológica no processo de corte por arranque da apara*”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

Çiçek Adem, Turgay Kivak, Gürcan Samtas, Yusuf Çay, “*Modelling of Thrust Forces in Drilling of AISI 316 Stainless Steel Using Artificial Neural Network and Multiple Regression Analysis*”, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 58, 7-8, 492-498, 2012b.

- Çiçek, Adem, Turgay Kivak, Gurcan Samtas,** “*Application of Taguchi Method for Surface Roughness and Roundness Error in Drilling of AISI 316 Stainless Steel*”, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 58, 3, 165-174, 2012a.
- Cvijovic, Z., Radenkovic, G.,** “*Microstructure and pitting corrosion resistance of annealed duplex stainless steel*”, *Corrosion Science*, 48, 2006.
- Davim, J. P.,** “*Maquinabilidade de materiais compósitos - Análise experimental*”, Lição de síntese, 2005.
- Davim, J. P., Correia, A. E.,** “*Maquinagem a Alta Velocidade – Fresagem/CNC*”, *Publindústria*, 2006.
- Davim, J. P., Gomez R. Peixoto C.,** “*Uma abordagem à maquinagem ecológica com lubrificação mínima*”, *Manutenção*, nº 86/87, 4-9, 2005.
- Davis, J. R.,** “*ASM Special Handbook: Stainless Steels, ASM Internacional*”, *Ohio*, p. 577, 1994.
- Davis, J.R.,** “*Stainless Steel – ASM, Specialty Handbook 2.ed.*”, *ASM International*, EUA, 1996.
- El-Sonbaty, U. A. Khashaba, T Machaly, T.,** “*Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites*”, *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 329-338, 2004.
- Ferraresi,** “*Desgaste e vida das ferramentas de usinagem*”, I Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste (ABM), São Paulo, 3-26, 1989.
- Ferraresi, D.,** “*Fundamentos da usinagem dos metais*”, Editora Edgard Bhücher, São Paulo, 1970.
- Fritz Klocke,** “*Manufacturing Processes 1 – Cutting*”, Springer, 2010
- Huang H. Hui,** “*Estudo teórico-experimental da distribuição de temperatura na zona de corte no processo de torneamento usando FEM (Finite element method) usando o software Abaqus*”, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- Ibrahim Ciftci,** “*Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools*”, *Tribology International*, 39, 565–569, 2006.
- Jahanmir, S., Ramulu, M., Koshy, P.,** “*Machining of ceramics and composites*”, Marcell Dekker Inc., New York, 1998

- Jiang, D. Y., Watkins T. R., Kozaczek, K. J., Hubbard, C. R., Cavin O. B., "Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel", *Wear*, 194,168–173, 1996.
- Kalhuri V., Dan Wedberg, Lars-Erik Lindgren, "SIMULATION OF MECHANICAL CUTTING USING A PHYSICAL BASED MATERIAL MODEL" *Int J Mater Form* (2010) Vol. 3 Suppl 1:511– 514, 2010.
- Kalpak, S., Schmid, S.R., "Manufactura, ingeniería y tecnología", Pearson Educacion, México, 2002.
- Kalpakjian, S., "Manufacturing Process for Engineering Materials", Adisson-Wesley Publishing Company, 1985.
- Kelly J. F., Cotterell M. G., "Minimal lubrication machining of aluminium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 327-334, 2002.
- König, W., Klocke, F., "Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren, 5.ed." Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Alemanha, 1997.
- Leppert T., Peng, R. L., "Residual stresses in surface layer after dry and MQL turning of AISI 316L steel", *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2012.
- M'Saoubi, R., J. L. Lebrun & Changeux, B., "A new method for cutting tool temperature measurement using CCD infrared technique: Influence of tool and coating", *Machining Science and Technology: An International Journal*, 2:2, 369-382, 2007.
- M'Saoubi, R., "Aspects Thermiques et Microstructuraux de la Coupe," Thesis ENSAM-Paris, France (1998).
- M'Saoubi, R., Chandrasekaran, H., "Experimental study and modeling of tool temperature distribution in orthogonal cutting of AISI 316L and AISI 3115 steels", *Int J Adv Manuf Technol*, 56,865–877, 2011.
- M'Saoubi, R., Outeiro, J.C., Changeux, B., Lebrun, J.L., Morão Dias A., "Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels", *Journal of Materials Processing Technology*, 96,225-233, 1999.
- Macari F. N., Machado I. F., "Efeito dos parâmetros de maquinagem na força de corte e no acabamento superficial de três aços inoxidáveis austeníticos", 2005.
- Machado, A. R. Silva, M. B., "Fluidos de corte para HSM", In: *Usinagem em altíssimas velocidades*, Érica, 49-79, 2003.

Maranhão C. et Davim J. P., 2010 “*Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: Numerical simulation and experimental validation*”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18, 139–156, 2010.

Matthew J. Donachie, J., “*Titanium - A Technical Guide, ed. 2*”, Materials Park, Ohio: ASM International, 2000.

Merchant M.E. J., “*Applied Physics. Vol. 66*”, 168, 1944.

Mesquita R. D., “*O desgaste das ferramentas de corte e sua relação com as forças de corte*”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 1-125, 1988.

Mesquita R. M. D. e Marques M. J. M., “*Corte por Arranque de Apara*”, Aeist, Lisboa, 1990.

Muñoz-Sanchez, A., Canteli, J.A., Cantero, J.L., Miguelez, M.H., “*Numerical analysis of the tool wear effect in the machining induced residual stresses*”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 872–886, 2011.

Nikolaos I. Galanis, Dimitrios E. Manolakos, “*Surface roughness prediction in turning of femoral head*”, *Int J Adv Manuf Technol*, 51, 79–86, 2010.

Norma ISO 3685, “*Tool-life testing single-point turning tools, 2. Ed*”, 1993.

Outeiro J. C., Dias A. M., Jawahir I. S., “*On the Effects of Residual Stresses Induced by Coated and Uncoated Cutting Tools with Finite Edge Radii in Turning Operations*”, 2006a.

Outeiro J. C., Pina J. C., M’Saoubi R., Pusavec F., Jawahir, I. S., “*Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials*”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 77–80, 2008.

Outeiro J. C., Umbrello D., M’Saoubi R., “*Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel*”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1786–1794, 2006b.

Outeiro, J. C., Dias, A. M., Lebrun J. L. & Astakhov V. P., “*MACHINING RESIDUAL STRESSES IN AISI 316L STEEL AND THEIR CORRELATION WITH THE CUTTING PARAMETERS*”, *Machining Science and Technology*, 6:2, 251-270, 2002.

P. Marimuthu and K. Chandrasekaran, “*Experimental study on stainless steel for optimal setting of machining parameters using Taguchi and Neural network*”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, VOL. 6, NO. 10, OCTOBER 2011.

S. Ranganathan, T. Senthilvelan & G. Sriram, *“Evaluation of Machining Parameters of Hot Turning of Stainless Steel (Type 316) by Applying ANN and RSM”*, Materials and Manufacturing Processes, 25:10, 1131-1141, 2010.

S. Ranganathan, T. Senthilvelan, *“optimizing the process parameters tool wear of WC insert when hot turning of AISI 316 Stainless steel”*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 5, NO. 7, JULY 2010.

Sandvik - Coromant, *“Ferramentas para torneamento Catálogo C-1000:8”*, 2002

Sandvik, *“Catálogo Principal”*, 2010.

Sanjib Kumar Hansda, *“Machinability Study of AISI 316 Grade Austenitic Stainless Steel Using P 30 Grade Cemented Carbide Insert”*, Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of B. Tech. In Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, 2011.

Sedriks, A. J., *“Corrosion of stainless steels, 2nd ed.”*, John Wiley: NY, 1996.

Silva, M.B.; Wallbank, J., *“Cutting temperature: prediction and measurement methods - a review”*, Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, v.88. pp.195-202, 1999.

Simões Morais, J., *“Desenho Técnico Básico 3”*, Porto Editora, LDA; 23ª Edição; Pré Impressão e Fotolitos Cipriano Costa; Edição e Execução Gráficos Reunidos, LDA; pp 182-234, 2006

Smith, W. F., *“Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais”*, Editora McGraw-Hill, 3ª edição, 1998.

Soares, P., *“Aços – características e tratamentos”*, Livraria Livroluz – Porto, 1992.

Sokovic, M., Mijanovic, K., *“Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes”*, Journal of Materials Processing Technology, 109, 181-189, 2001.

Soreng, A., *“Performance of Multilayer Coated Tool in Dry Machining of AISI 316 Austenitic Stainless Steel”*, 2011.

Stemmer, C. E., *“Ferramentas de corte I”*, 3ª edição, Editora da UFSC, Florianópolis, 1995.

Taylor F. W., *“On the art of cutting metals.”* Trans ASME 28: 31–58. 1907.

Tekiner Zafer, Yesilyurt Sezgin, *“Investigation of the cutting parameters depending on process*

sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel”, *Materials and Design* 25, 507–513, 2004.

Trent, E. M., *”Metal cutting 3rd edition”*, Oxford (England); Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.

Turgay Kivak, Gürcan Samtas, Adem Çiçek, *”Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills”*, *Measurement* 45,1547–1557, 2012.

Umbrello D., M’Saoubi R., Outeiro J. C., *”The influence of Johnson–Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel”*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 462–470, 2007.

Viktor P. A.; Davim J. P., *”Tools (Geometry and Material) and Tool Wear”*, 2002.

Wiklund, U., Rubino S., Ka’ das K., Skorodumova N.V., Eriksson O., Hedberg S., Collin, M., Olsson, A., Leifer, K., *”Experimental and theoretical studies on stainless steel transfer stainless steel transfer”*, *Acta Materialia*, 59, 68–74,2011.

Young, H.T., *”Cutting Temperature Responses to Flank Wear”*, *Wear*. v. 201. pág. 117-120, Elsevier, Artigo, 1996.

Zaman, M. T., Kumar, A. S., Rahman, M., Sreeram, S., *”A three dimensional analytical cutting force model for micro end milling operation”* *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, p. 353-366, 2006.

Anexo

6 Anexo

Tabela 6.1 – Programa CNC utilizado para efetuar o desbaste na peça inicial.

O1000		
N10	G21 G90 G95 G40;	Unidades em sistema métrico; Sistema de coordenadas absolutas; Velocidade de Avanço em milímetros por minutos (mm/min.); Cancelar compensação do raio da ferramenta.
N20	G28 U0;	Retorno ao ponto de referência; Ponto de Segurança.
N30	G92 S3000;	Limitar a velocidade máxima de rotação da árvore.
N40	T0707;	Chamada da ferramenta.
N50	G96 S100 M04;	Velocidade de corte constante de 100 m/min; Rotação da árvore no sentido anti-horário (CCW).
N60	G00 X100. Z5.;	Avanço rápido para o ponto de aproximação do contorno.
N70	X98.;	Avanço rápido para a respetiva coordenada.
N80	G01 Z-70. F0.1;	Interpolação linear e início do contorno.
N90	G00 X100.;	Avanço rápido á respetiva coordenada.
N100	Z5.;	Avanço rápido á respetiva coordenada.
N110	G28 U0;	Retorno ao ponto de referência; Ponto de Segurança
N120	M30;	Fim de programa

Tabela 6.2 – Programa CNC utilizado nos ensaios de corte curtos.

O1100		
N10	G21 G90 G95 G40;	Unidades em sistema métrico; Sistema de coordenadas absolutas; Velocidade de Avanço em milímetros por minutos (mm/min.); Cancelar compensação do raio da ferramenta.
N20	G28 U0;	Retorno ao ponto de referência; Ponto de Segurança.
N30	G92 S3000;	Limitar a velocidade máxima de rotação da árvore.
N40	T0707;	Chamada da ferramenta.
N50	G96 S75 M04;	Velocidade de corte constante de 75 m/min; Rotação da árvore no sentido anti-horário (CCW).
N60	G00 X100. Z5.;	Avanço rápido para o ponto de aproximação do contorno.
N70	X96.;	Avanço rápido á respetiva coordenada.
N80	G01 Z-15. F0.05;	Interpolação linear e início do contorno.
N90	G00 X100.;	Avanço rápido á respetiva coordenada.
N100	G01 X96.;	Interpolação linear á respetiva coordenada.
N110	G01 Z-30. F0.2;	Interpolação linear e início do contorno.
N120	G00 X100.;	Avanço rápido á respetiva coordenada.
N130	G01 X96.;	Interpolação linear á respetiva coordenada
N140	G01 Z-45. F0.2;	Interpolação linear e início do contorno.
N150	G00 X100.;	Avanço rápido á respetiva coordenada.
N160	G01 X96.;	Interpolação linear á respetiva coordenada
N170	G01 Z-60. F0.4;	Interpolação linear e início do contorno.
N180	G00 X100.;	Avanço rápido á respetiva coordenada.
N190	Z5.;	Interpolação linear á respetiva coordenada
N200	G28 U0;	Retorno ao ponto de referência; Ponto de Segurança
N210	M30;	Fim de programa

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Tabela 6.3 – Programa CNC utilizado nos ensaios de corte longos.

O1150		
N10	G21 G90 G95 G40;	Unidades em sistema métrico; Sistema de coordenadas absolutas; Velocidade de Avanço em milímetros por minutos (mm/min.); Cancelar compensação do raio da ferramenta.
N20	G28 U0;	Retorno ao ponto de referência; Ponto de Segurança.
N30	G92 S3000;	Limitar a velocidade máxima de rotação da árvore.
N40	T0707;	Chamada da ferramenta.
N50	G96 S75 M04;	Velocidade de corte constante de 75 m/min; Rotação da árvore no sentido anti-horário (CCW).
N60	G00 X100. Z5.;	Avanço rápido para o ponto de aproximação do contorno.
N70	X92.;	Avanço rápido para a respectiva coordenada.
N80	G01 Z-70. F0.1;	Interpolação linear e início do contorno.
N90	G00 X100.;	Avanço rápido á respectiva coordenada.
N100	Z5.;	Avanço rápido á respectiva coordenada.
N110	G28 U0;	Retorno ao ponto de referência; Ponto de Segurança
N120	M30;	Fim de programa

Tabela 6.4 – Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos a seco, com a ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara).

Parâmetros de rugosidades [µm]	Profundidade de corte, p=1mm								
	Vc=300 m/min			Vc=150 m/min			Vc=75 m/min		
	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.
Ra	0,66	1,51	3,67	1,46	1,99	4,51	1,07	2,31	4,44
RzD	5,87	6,52	16,24	9,58	10,57	16,84	8,99	12,03	17,06
Rzl	6,99	6,68	16,40	10,43	11,55	17,68	10,79	12,24	17,41
Rzj	8,69	7,44	17,13	11,73	12,48	18,86	13,81	13,26	19,39
RmD	7,77	7,15	17,11	10,78	11,95	18,60	11,57	12,98	17,79
Rmj	9,96	8,21	18,05	12,78	13,23	20,84	15,61	14,47	19,99
Rt	7,35	7,83	17,25	11,32	12,19	18,87	11,89	13,03	18,04
Rp	6,37	5,01	10,98	7,30	8,08	11,93	8,89	9,29	11,79
Rpm	4,68	4,45	10,31	6,22	6,99	10,56	6,66	8,52	11,13
Rq	1,09	1,79	4,32	1,92	2,49	5,09	1,61	2,95	5,27
R3Z	3,15	5,78	14,68	7,31	8,68	14,46	4,67	10,73	15,35
Pt	9,96	8,21	18,05	12,78	13,23	20,84	15,61	14,47	19,99
Pc [/cm]	0051	0096	0050	0145	0099	0049	0122	0064	0200
Sm	206,77	103,40	200,00	69,13	100,83	203,33	82,87	155,87	200,00

Tabela 6.5 – Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos com lubrificação, com a pastilha M25 (revestida e com quebra-apara).

Parâmetros de rugosidades [µm]	Profundidade de corte, p=1mm								
	Vc=300 m/min			Vc=150 m/min			Vc=75 m/min		
	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.
Ra	0,46	0,88	3,33	0,39	0,89	3,62	0,45	1,08	3,22
RzD	3,45	4,11	14,05	2,67	4,79	15,43	2,87	5,05	13,90
Rzl	3,79	4,15	14,33	3,06	4,84	15,71	2,97	5,14	14,09
Rzj	5,08	5,31	15,56	4,93	5,17	17,18	3,63	6,20	17,67
RmD	4,03	4,29	14,59	3,48	4,97	16,81	3,45	5,25	14,69
Rmj	5,84	5,62	16,27	5,93	5,52	18,58	4,33	6,69	18,43
Rt	4,27	4,37	14,79	3,71	5,07	17,15	3,55	5,36	14,73
Rp	2,77	2,46	9,81	2,49	3,23	11,33	2,35	3,11	9,46
Rpm	2,18	2,34	9,28	1,63	3,08	10,02	1,74	2,97	8,91

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Rq	0,61	1,03	3,88	0,50	1,09	4,26	0,58	1,29	3,84
R3Z	2,35	3,70	12,24	1,67	4,10	13,41	2,31	4,52	11,90
Pt	5,84	5,62	16,27	5,93	5,52	18,58	4,33	6,69	18,43
Pc [/cm]	0436	0099	0049	0038	0096	0050	0134	0096	0049
Sm	88,58	100,83	203,50	262,50	103,40	200,00	74,97	103,40	203,33

Tabela 6.6 – Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos a seco, com a pastilha P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

Parâmetros de rugosidades [µm]	Profundidade de corte, p=1mm								
	Vc=300 m/min			Vc=150 m/min			Vc=75 m/min		
	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.
Ra	0,57	1,10	3,60	1,63	1,93	3,71	2,80	3,97	4,91
RzD	3,82	5,64	16,06	8,69	9,65	16,34	14,78	17,63	19,22
RzI	4,31	5,73	16,39	10,02	10,07	17,31	17,40	18,47	19,36
RzJ	5,89	6,61	17,57	13,78	11,66	20,42	21,61	18,49	20,74
RmD	5,36	6,19	17,38	13,37	11,81	19,17	17,79	20,93	19,73
RmJ	7,47	7,11	18,65	16,35	13,55	22,43	23,55	24,62	21,75
Rt	5,63	6,29	17,52	13,52	11,97	19,17	18,85	20,93	19,85
Rp	3,99	4,06	11,35	9,94	6,93	11,10	12,13	11,37	10,41
Rpm	2,52	3,58	10,40	5,87	5,29	9,16	9,68	8,96	9,92
Rq	0,73	1,34	4,29	1,98	2,28	4,30	3,70	4,56	5,54
R3Z	2,47	5,00	14,13	5,46	7,95	14,65	9,80	15,61	18,23
Pt	7,47	7,11	18,65	16,35	13,55	22,87	23,55	24,64	21,75
Pc [/cm]	0447	0095	0200	0178	0101	0050	0381	0070	0049
Sm	85,33	105,20	200,00	56,11	99,19	200,30	84,45	142,93	203,50

Tabela 6.7 – Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos com lubrificação, com a pastilha P25 (sem revestimento e com quebra-apara).

Parâmetros de rugosidades [µm]	Profundidade de corte, p=1mm								
	Vc=300 m/min			Vc=150 m/min			Vc=75 m/min		
	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.	a=0,05 mm/rot.	a=0,10 mm/rot.	a=0,20 mm/rot.
Ra	0,52	1,23	3,50	0,47	1,51	4,16	0,61	1,17	3,81
RzD	3,49	5,25	14,49	3,39	6,11	16,78	3,16	5,81	15,67
RzI	4,04	5,34	14,89	3,67	6,23	17,04	3,31	5,92	15,95
RzJ	6,75	5,81	15,46	5,11	6,82	18,36	3,81	8,80	18,10
RmD	5,34	5,59	15,29	4,41	6,30	18,05	3,51	6,48	16,55
RmJ	9,19	6,21	16,20	5,97	7,25	19,71	4,27	9,47	19,27
Rt	5,62	5,75	15,49	4,59	6,53	18,18	3,55	6,54	17,05
Rp	4,11	3,75	9,94	3,29	3,79	11,35	1,79	3,81	10,07
Rpm	2,35	3,42	9,38	2,29	3,57	10,28	1,62	3,27	9,37
Rq	0,71	1,43	4,04	0,62	1,73	4,83	0,73	1,42	4,40
R3Z	2,37	4,58	13,16	2,39	5,64	15,20	2,73	5,06	14,06
Pt	9,19	6,21	16,17	5,97	7,25	19,71	4,27	9,47	19,27
Pc [/cm]	0094	0099	0050	0132	0097	0048	0182	0096	0050
Sm	106,70	100,83	200,00	76,66	102,50	207,00	55,11	104,30	200,00

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Tabela 6.8 – Parâmetros de rugosidade e do desgaste de ferramenta obtidos nos ensaios de corte longos a seco, com a pastilha M25 (revestida e com quebra-apara) e com a $V_c=300$ m/min.

	Tempo Corte [min.]	Ra [μm]	RzD [μm]	Rzl [μm]	RzJ [μm]	RmD [μm]	RmJ [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rpm [μm]	Rq [μm]	R3z [μm]	Pt [μm]	Pc [/cm]	Sm [μm]	VB [mm]
1	0,58	0,96	4,86	5,33	6,16	5,66	6,64	5,83	3,73	3,14	1,17	3,64	6,64	0095	104,37	0,063
2	1,13	0,99	5,12	5,36	6,29	5,67	6,75	5,87	3,95	3,46	1,22	3,72	6,75	0093	107,30	0,103
3	1,66	1,01	5,82	6,27	7,01	6,95	7,95	7,33	5,34	4,17	1,26	4,39	7,95	0096	103,53	0,135
4	2,16	1,01	5,34	5,47	6,15	5,73	6,69	5,93	3,89	3,51	1,26	4,22	6,69	0099	100,83	0,141
5	2,64	1,18	6,30	6,50	7,29	7,18	7,88	7,25	5,19	4,35	1,52	5,13	7,88	0098	101,67	0,147
6	3,09	1,34	6,97	7,26	8,52	7,83	9,09	7,95	5,41	4,67	1,70	5,79	9,09	0098	101,67	0,152
7	3,52	1,63	7,76	8,09	9,45	8,41	10,19	8,53	5,73	5,25	1,99	6,79	10,19	0099	100,83	0,160
8	3,92	1,42	8,03	9,01	11,18	13,26	15,93	13,55	9,86	4,96	1,78	5,03	15,93	0097	102,57	0,333

Tabela 6.9 – Parâmetros de rugosidade e do desgaste de ferramenta obtidos nos ensaios de corte longos a seco, com a pastilha M25 (revestida e com quebra-apara) e com a $V_c=75$ m/min.

	Tempo Corte [min.]	Ra [μm]	RzD [μm]	Rzl [μm]	RzJ [μm]	RmD [μm]	RmJ [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rpm [μm]	Rq [μm]	R3z [μm]	Pt [μm]	Pc [/cm]	Sm [μm]	VB [mm]
1	2,31	1,24	7,13	7,59	10,80	8,81	11,93	9,07	6,08	4,70	1,57	5,77	11,93	097	102,57	0,000
2	4,52	1,27	6,61	6,91	10,00	7,41	10,85	7,77	5,14	4,31	1,57	5,48	10,85	0097	102,50	0,056
3	6,64	1,33	7,02	7,60	9,75	7,50	10,42	8,13	5,19	4,58	1,68	6,17	10,42	0098	101,67	0,069
4	8,65	1,38	7,04	7,31	9,32	7,67	10,33	8,11	5,19	4,45	1,69	5,99	10,33	0098	101,67	0,074
5	10,56	1,49	7,55	7,76	11,43	8,27	12,78	8,59	5,23	4,57	1,78	6,26	12,78	0097	102,50	0,088
6	12,37	1,64	7,29	7,55	8,27	7,92	8,85	8,35	4,73	4,36	1,91	6,23	8,85	0097	102,50	0,103
7	14,07	1,66	7,26	7,45	8,49	7,88	8,96	8,00	4,90	4,47	1,93	6,19	8,96	0097	102,50	0,114
8	15,68	1,65	7,62	7,83	8,47	8,72	9,31	8,72	5,40	4,79	1,93	6,31	9,31	0097	102,50	0,119
9	17,19	1,61	7,71	8,12	9,37	8,55	10,23	8,92	5,69	5,10	1,88	6,42	10,23	0097	102,50	0,122
10	18,60	1,66	8,18	8,54	10,20	9,06	11,18	9,15	5,93	5,23	1,95	6,84	11,18	0097	102,50	0,137

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

11	19,91	1,71	8,46	9,04	10,16	9,42	10,67	9,55	6,43	5,64	2,04	7,34	10,67	0097	102,50	0,180
12	21,11	1,65	8,48	8,78	9,55	9,27	10,06	9,39	6,00	5,54	1,95	6,95	10,06	0097	102,50	0,201
13	22,22	2,43	10,13	10,36	10,93	10,67	11,47	10,81	6,33	5,92	2,87	9,17	11,47	0097	102,50	0,209
14	23,22	2,50	10,09	10,31	11,02	10,52	11,27	10,63	6,33	6,03	2,94	9,35	11,27	0097	102,50	0,217
15	24,13	2,36	9,97	10,32	11,89	10,86	12,71	11,02	6,43	5,87	2,79	9,01	12,71	0097	102,50	0,222
16	24,93	2,35	10,30	10,45	11,76	10,91	12,37	10,95	6,39	6,01	2,80	9,29	12,37	0097	102,50	0,227
17	25,64	2,37	10,36	10,49	11,48	10,74	12,03	10,91	6,47	6,16	2,82	9,36	12,03	0097	102,50	0,231
18	26,24	2,35	10,38	10,57	11,37	10,99	12,31	11,17	6,65	6,18	2,78	9,34	12,31	0097	102,50	0,250

Tabela 6.10 – Parâmetros de rugosidade e do desgaste de ferramenta obtidos nos ensaios de corte longos a seco, com a pastilha P25 (sem revestimento e com quebra-apara) e com a $V_c=300$ m/min.

	Tempo Corte [min.]	Ra [μ m]	RzD [μ m]	RzI [μ m]	RzJ [μ m]	RmD [μ m]	RmJ [μ m]	Rt [μ m]	Rp [μ m]	Rpm [μ m]	Rq [μ m]	R3z [μ m]	Pt [μ m]	Pc [/cm]	Sm [μ m]	VB [mm]
1	0,58	0,94	5,68	5,93	6,74	6,35	7,32	6,36	4,16	3,65	1,18	4,57	7,32	0097	102,50	0,058
2	1,13	0,97	5,25	6,25	10,24	6,89	11,44	6,93	3,93	3,10	1,21	4,24	11,44	0092	108,57	0,097
3	1,66	1,03	6,19	6,49	7,22	6,77	7,92	7,08	4,78	4,16	1,34	5,25	7,92	0099	100,83	0,125
4	2,16	1,44	7,15	7,44	8,40	7,67	8,77	7,76	4,82	4,49	1,81	6,43	8,77	0100	100,02	0,145
5	2,64	1,65	8,10	8,32	9,22	8,33	9,64	8,60	5,57	5,29	2,09	7,46	9,64	0099	100,83	0,163
6	3,09	1,77	8,09	8,28	9,53	8,49	9,90	8,64	5,43	5,15	2,20	7,36	9,90	0098	101,67	0,176
7	3,52	2,04	8,53	8,69	10,41	8,75	10,77	8,95	5,64	5,39	2,45	7,96	10,77	0098	101,67	0,180
8	3,92	2,00	7,99	8,18	9,23	8,43	9,65	8,57	5,11	4,77	2,34	7,34	9,65	0099	100,83	0,192
9	4,30	2,07	8,59	8,90	10,67	9,07	11,22	9,27	5,44	5,22	2,44	7,92	11,22	0098	101,67	0,199
10	4,65	2,10	9,26	9,42	12,15	10,62	13,24	10,77	6,86	5,81	2,49	8,14	13,24	0097	102,50	0,254

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Tabela 6.11 – Parâmetros de rugosidade e do desgaste da ferramenta obtidos nos ensaios de corte longos a seco, com a ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara) e com a $V_c=75$ m/min.

	Tempo Corte [min.]	Ra [μm]	RzD [μm]	RzI [μm]	RzJ [μm]	RmD [μm]	RmJ [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rpm [μm]	Rq [μm]	R3z [μm]	Pt [μm]	Pc [/cm]	Sm [μm]	VB [mm]
1	2,31	0,77	4,54	4,69	5,72	4,86	6,23	5,15	2,34	2,06	0,94	3,64	6,23	0117	85,13	0.132
2	4,52	0,86	4,91	5,29	6,72	5,85	7,35	6,09	2,95	2,15	1,04	3,97	7,35	0143	69,79	0,145
3	6,64	0,90	4,79	5,41	7,13	5,35	7,68	5,49	2,63	2,32	1,07	4,15	7,68	0145	69,20	0,151
4	8,65	0,99	5,46	5,81	7,16	6,31	7,75	6,47	3,38	2,90	1,20	4,62	7,75	0142	70,66	0,163
5	10,56	1,21	5,41	5,61	6,86	9,14	7,49	5,96	2,84	2,62	1,39	4,82	7,49	0190	52,63	0,168
6	12,37	1,79	8,92	9,05	10,45	9,58	11,07	9,69	4,11	3,81	2,08	7,88	11,07	0401	99,19	0,175
7	14,07	1,89	9,45	9,62	11,26	10,97	12,43	11,05	5,46	4,24	2,20	8,22	12,43	0097	102,50	0,195
8	15,68	1,88	8,49	8,56	10,29	9,22	11,09	9,31	3,91	3,69	2,14	7,59	11,09	0097	102,50	0,201
9	17,19	1,92	9,03	9,18	10,59	9,91	11,53	10,09	4,77	4,05	2,22	8,14	11,53	0097	102,50	0,207
10	18,60	2,02	9,71	10,00	11,63	11,25	13,12	11,35	5,79	4,39	2,33	8,56	13,12	0097	102,50	0,214
11	19,91	2,01	8,97	9,13	10,99	9,37	11,58	9,47	3,91	3,78	2,31	8,52	11,58	0097	102,50	0,252

Tabela 6.12 – Valores de IT normalizados.

Tolerâncias em μm																				
Diam. nominal	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
de 80 a 120 mm	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	5400

[ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316]

Tabela 6.13 – Valores de IT calculados para a Ferramenta M25 (revestida e com quebra-apara)

Profundidade de corte, p=1mm						
avanço [mm/rot.]	Vc=300 m/min		Vc=150 m/min		Vc=75 m/min	
	M25 a seco	M25 lub.	M25 a seco	M25 lub.	M25 a seco	M25 lub.
0,05	19,80	13,80	43,80	11,70	32,10	13,50
0,1	45,30	26,40	59,70	26,70	69,30	32,40
0,2	110,10	99,90	135,30	108,60	133,20	96,60

Tabela 6.14 – Valores de IT calculados para a Ferramenta P25 (sem revestimento e com quebra-apara)

Profundidade de corte, p=1mm						
avanço [mm/rot.]	Vc=300 m/min		Vc=150 m/min		Vc=75 m/min	
	P25 a seco	P25 lub	P25 a seco	P25 lub.	P25 a seco	P25 lub
0,05	17,10	15,60	48,90	14,10	84,00	18,30
0,1	33,00	36,90	57,90	45,30	119,10	35,10
0,2	108,00	105,00	111,30	124,80	147,30	114,30

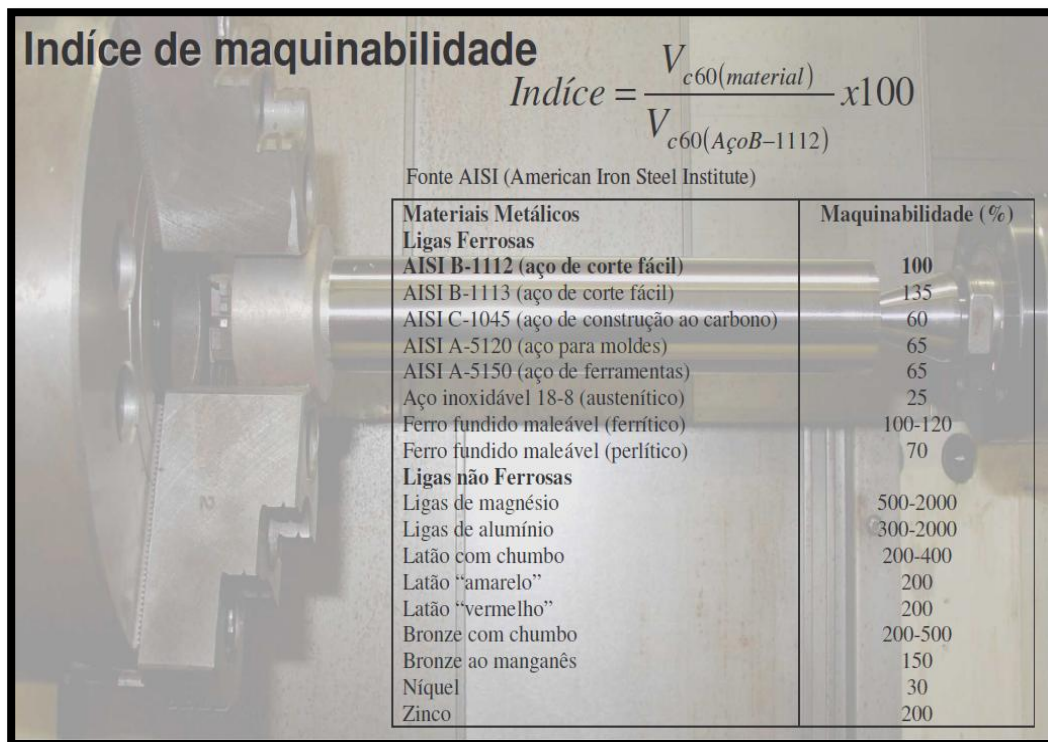


Figura 6.1 – Índice de maquinabilidade para diferentes materiais.

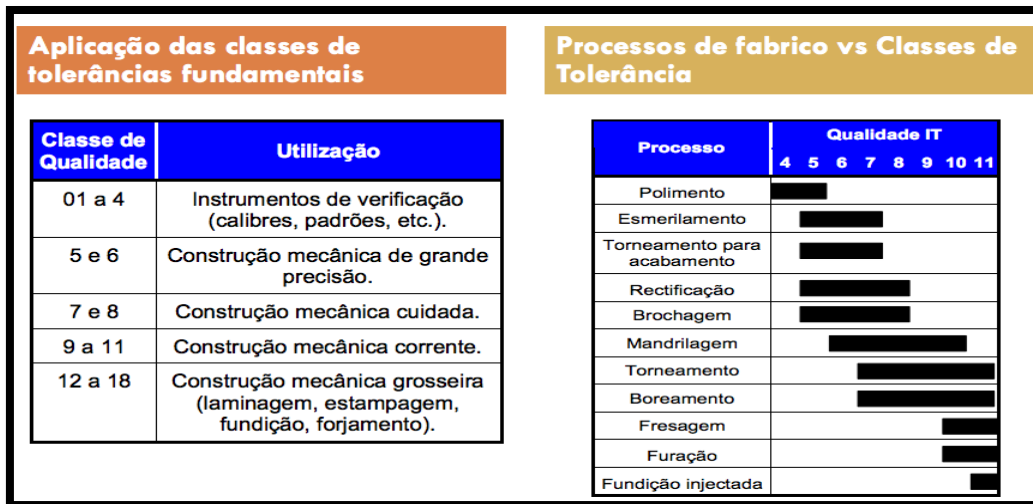


Figura 6.2 – Classes de Qualidade IT¹⁰

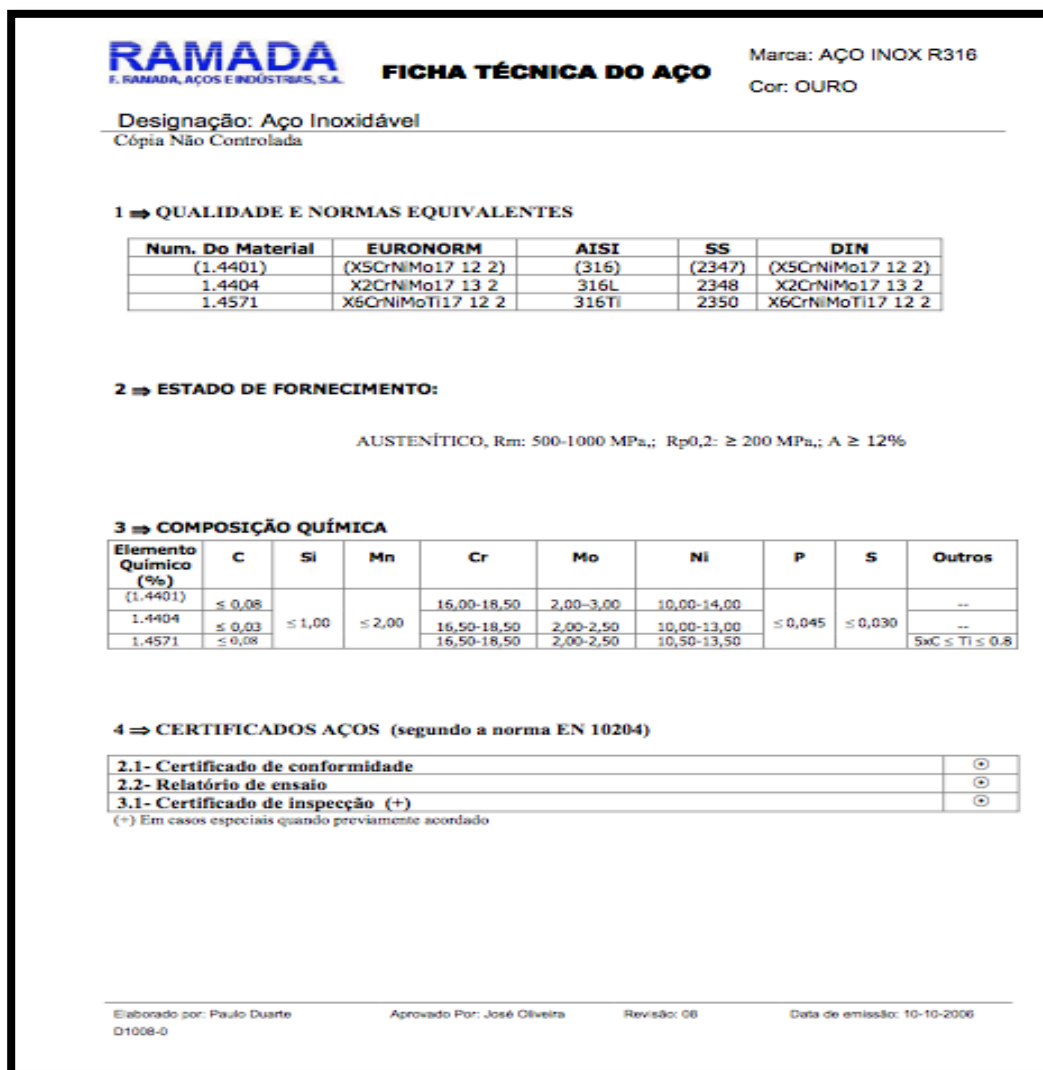


Figura 6.3 – Certificado do Aço Inoxidável AISI 316 usado nos ensaios.

¹⁰ http://dspace.esta.ipt.pt/dspace_esta/bitstream/1234/665/1