



Pedro Miguel Mendes **Análise da maquinabilidade do aço AISI P20**
Alves Pequito Gaspar



**Pedro Miguel Mendes
Alves Pequito Gaspar**

Análise da maquinabilidade do aço AISI P20

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 Associado Com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha mãe, ao meu pai, à minha avó e ao meu irmão, pelo apoio fundamental que me deram, sem o qual, dificilmente eu teria chegado ao fim deste percurso.

o júri

Presidente	Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais, Professor Associado, Universidade de Aveiro
Arguente principal	Prof. Doutor Carlos Alberto da Conceição António Professor Associado Com Agregação, Universidade do Porto
Orientador	Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva Professor Associado Com Agregação, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Neste trabalho quero agradecer:

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.

Ao Engenheiro Carlos Lauro, pela disponibilidade, pela ajuda prestada no laboratório e pela transmissão de conhecimentos.

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

À minha família 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.

palavras-chave

Aço de construção ligado, maquinagem, torneamento, ferramentas de corte, rugosidade da superfície, desgaste da ferramenta.

resumo

No presente trabalho realizou-se um estudo sobre a maquinabilidade do aço de construção ligado AISI P20, em operações de torneamento, usando duas ferramentas de corte da mesma classe, mas com propriedades diferentes, uma com maior resistência ao desgaste (P05) e outra com maior tenacidade (P15). O estudo foi desenvolvido em três 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) e obtidas curvas de vida das ferramentas segundo o modelo de Taylor, recorrendo aos ensaios de corte longos.

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

Na terceira e última fase foram previstas forças e temperaturas no processo de corte através de simulações numéricas pelo método dos elementos finitos.

keywords

Mould steel, machining, turning, cutting tools, surface finish, tool wear.

abstract

In the current dissertation was carried out a study on the machinability of AISI P20 mould steel in turning operations. For this process it was used two identical cutting tools but with different properties: one with higher resistant to wear (P05) and one with higher tenacity (P15). The study was conducted in three different phases.

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

On the third and last stage it was predicted the forces and temperatures involved into cutting process, with a numeric simulation by finite elements method.

ÍNDICE

Índice.....	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Organização do trabalho.....	3
2 Maquinabilidade do aço AISI P20 - Revisão bibliográfica.....	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 de construção	7
2.1.4 Aplicações.....	8
2.2 Maquinagem do aço de construção AISI P20	8
2.2.1 Corte por arranque de apara	8
2.2.2 Parâmetros de corte.....	9
2.2.3 Ferramentas de corte	9
2.2.4 Fluidos de Corte.....	11
2.2.5 Condições de corte testadas	12
2.3 Maquinabilidade	13
2.3.1 Forças de Corte	14
2.3.2 Aparas	16
2.3.3 Desgaste da vida das ferramentas	18
2.3.4 Rugosidade da superfície/precisão dimensional.....	20
2.4 Síntese	24
3 Procedimento Experimental	27
3.1 Considerações Gerais	27
3.2 Material e provetes	27
3.2.1 Material	27
3.2.2 Provetes.....	28
3.3 Ferramentas de corte	28
3.4 Máquina-ferramenta	31
3.5 Parâmetros de corte	33

3.5.1	Estratégia de corte.....	34
3.6	Caracterização da superfície.....	36
3.6.1	Medição da rugosidade.....	36
3.6.2	Medição do desgaste da ferramenta.....	38
3.6.3	Caracterização da apara.....	40
3.7	Simulação de forças de corte e temperatura	41
3.8	Síntese.....	43
4	Análise e Discussão de Resultados	45
4.1	Análise da Maquinabilidade do Aço AISI P20 (Ensaio de Corte Curtos).....	45
4.1.1	Forma de aparas obtidas	45
4.1.2	Rugosidade da superfície	50
4.2	Análise da maquinabilidade do Aço AISI P20 (Ensaio de corte longos).....	57
4.2.1	Rugosidade da Superfície.....	57
4.2.2	Desgaste e vida da ferramenta de corte	59
4.3	Análise das simulações numéricas por elementos finitos	65
5	Considerações Finais	67
5.1	Conclusões	67
5.2	Trabalhos Futuros	68
6	Referências	69
	ANEXOS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -Representação esquemática do corte por arranque de apra; a) Corte Oblíquo; b) Corte Ortogonal (Merchant, 1944)	9
Figura 2.2 - Evolução da maquinagem com fluidos de corte (Davim and Correia, 2006) .	12
Figura 2.3 - Esquema ilustrativo da força de maquinagem (Klocke and Kuchle, 2011)	15
Figura 2.4 –Forças de corte a variar com o tempo de maquinagem da ferramenta (Sahoo and Sahoo, 2012)	16
Figura 2.5 -Tipos de apra segundo Groover (2010) : a) descontínua, b) contínua regular, c) contínua irregular, d) serrilhada	17
Figura 2.6 - Desgaste do flanco em função do tempo de vida (Bhuiyan, Choudhury and Dahari, 2014).....	18
Figura 2.7 – Comparação do tempo de vida das ferramentas utilizadas por Chinchankar and Choudhury (2013) para os parâmetros testados	19
Figura 2.8 - Evolução do desgaste em função do tempo de corte para as pastilhas em estudo (Chinchankar and Choudhury, 2013).....	20
Figura 2.9 – Efeito que a rugosidade (elevada) pode ter no contacto de peças com lubrificante	21
Figura 2.10 – Rugosidade (R_a e R_t) e desgaste (V_B) em função da distância de corte feita pela ferramenta (Diniz and Coppini, 1992).....	22
Figura 2.11 – Evolução da rugosidade superficial durante os testes de tempo de vida da ferramenta (Uhlmann et al., 2013)	23
Figura 2.12 – Variação da rugosidade superficial (R_a) com o tempo de vida para ferramentas testadas no torneamento de aço AISI 4340 (Sahoo and Sahoo, 2012)	24
Figura 3.1 – Aspeto dos provetes antes de serem submetidos aos testes de torneamento (esquerda) e suas dimensões (direita).....	28
Figura 3.2 – Porta ferramentas utilizado nos ensaios.....	29
Figura 3.3 - Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios	29
Figura 3.4 - Camadas do revestimento das ferramentas (Sandvik Coromant, 2012)	30
Figura 3.5 – Posicionamento dos vários graus relativamente ao tipo de corte, em função da resistência ao desgaste e/ou tenacidade (Giovanetti, 2008)	30
Figura 3.6 – Torno CNC Kingsbury MHP 50 onde foram efetuados os ensaios práticos..	31
Figura 3.7 – Bucha do torno CNC Kingsbury MHP 50.....	32
Figura 3.8 – Ilustração do esquema de corte nos ensaios de corte curtos	34
Figura 3.9 - Ilustração do esquema de corte nos ensaios de corte longos	35
Figura 3.10 - Demonstração de um ensaio de corte longo	36
Figura 3.11 – Posição do provete nas medições da rugosidade	37

Figura 3.12 – Equipamento utilizado na medição da rugosidade	37
Figura 3.13 – Esquema de medição da rugosidade. Face frontal do provete cilíndrico....	38
Figura 3.14 – Zonas de desgaste da ferramenta de corte	38
Figura 3.15 – Equipamento utilizado na medição do desgaste das ferramentas de corte	39
Figura 3.16 - Classificação das aparas.....	40
Figura 3.17 – Metodologia da modelação.....	42
Figura 3.18 – Definição da malha para a ferramenta	42
Figura 3.19 – Definição da malha para o corpo a ser maquinado	42
Figura 3.20 – Organograma do procedimento experimental	43
Figura 4.1 - Rugosidade média aritmética (Ra) em função do avanço (ferramenta P05) .	51
Figura 4.2 - Rugosidade máxima (Rt) em função do avanço (ferramenta P05)	52
Figura 4.3 – Evolução do IT em função do avanço para as velocidades de corte testadas (ferramenta P05)	53
Figura 4.4 – Evolução do IT em função do avanço para ensaios a seco e com uso de lubrificante (ferramenta P05)	54
Figura 4.5 – Rugosidade média aritmética (Ra) em função do avanço (ferramenta P15)	55
Figura 4.6 – Rugosidade máxima (Rt) em função do avanço (ferramenta (P15)	56
Figura 4.7 - Evolução do IT em função do avanço para as velocidades de corte testadas (ferramenta P15)	56
Figura 4.8 - Evolução do IT em função do avanço para ensaios a seco e com uso de lubrificante (ferramenta P15)	57
Figura 4.9 - Rugosidade média aritmética (Ra) em função do desgaste das ferramentas de corte com os parâmetros: $v_c=150\text{m/min}$; $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$	58
Figura 4.10 - Variação da rugosidade máxima (Rt) em função do desgaste das ferramentas de corte com os parâmetros: $v_c=150\text{m/min}$; $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$	59
Figura 4.11 - Desgaste das ferramentas de corte em função do tempo para os parâmetros: $v_c=300\text{m/min}$; $a=0,2\text{mm/rot}$ e $p=2\text{mm}$	60
Figura 4.12 - Desgaste das ferramentas de corte em função do tempo para os parâmetros: $v_c=150\text{m/min}$; $a=0,2\text{mm/rot}$ e $p=2\text{mm}$	60
Figura 4.13 - Desgaste das ferramentas de corte em função do tempo para os parâmetros: $v_c=150\text{m/min}$; $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$	61
Figura 4.14 – Curva de vida das ferramentas P05 e P15 para ensaios de corte com avanço de $0,2\text{mm/rot}$ e profundidade de 2mm	64
Figura 4.15 - Mapa da temperatura no processo de corte por arranque de avara	65
Figura 4.16 - Forças e temperaturas de corte para $v_c=300\text{m/min}$, $a=0,2\text{mm/rot}$ e $p=2\text{mm}$	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química dos aços mais utilizados na indústria de moldes (Buderus, 2010)	5
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas do aço AISI P20 (ThyssenKrupp, 2013), (Meusburger, 2013),(Buderus, 2010)	7
Tabela 2.3 - Parâmetros de corte utilizados em outros trabalhos.....	13
Tabela 3.1 - Composição química do aço AISI P20	27
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do aço tratado AISI P20	28
Tabela 3.3 – Identificação e geometria de corte das ferramentas utilizadas no trabalho experimental	29
Tabela 3.4 – Características do torno CNC Kingsbury MHP 50, utilizado no estudo do aço AISI P20	32
Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados para ensaios de corte curtos	33
Tabela 3.6 - Desvio dos resultados da modelação.....	41
Tabela 4.1 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 150m/min, para as duas ferramentas de corte	46
Tabela 4.2 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 300m/min, para as duas ferramentas de corte	47
Tabela 4.3 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 450m/min, para as duas ferramentas de corte	48
Tabela 4.4 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 300m/min e com utilização de lubrificante, para as duas ferramentas de corte.....	49
Tabela 4.5 – Resumo da classificação das formas de apara obtidas para cada situação nos ensaios de corte curtos	50
Tabela 4.6 - Desgaste (mm) das ferramentas utilizadas após ensaios de corte longos com $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$	62
Tabela 4.7 - Desgaste (mm) das ferramentas utilizadas após ensaios de corte longos com $v_c=150\text{m/min}$, $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$	63
Tabela 4.8 – Resumo do tempo de vida e desgaste das ferramentas para os ensaios efetuados com avanço de 0.2mm/rot e profundidade de 2mm	63
Tabela 4.9 - Valores de x e de K para as ferramentas P05 e P15.....	64
Tabela 4.10 - Média dos valores máximos referentes às forças de corte e temperatura associadas às várias situações de corte	66
Anexo A - Programa CNC utilizado para realizar os ensaios de corte curtos	73
Anexo B - Programa CNC utilizado nos ensaios de corte longos.....	74

Anexo C - Desgaste observado e comprimento total maquinado após cada ensaio.....	75
Anexo D - Valores de desgaste e comprimento maquinado a inserir nas equações 8 e 976	
Anexo E - Valores de X e K obtidos.....	77
Anexo F - Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos com a ferramenta P05	78
Anexo G - Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos com a ferramenta P05	78
Anexo H - Valores de IT normalizados para um diâmetro nominal entre 30 e 50 mm.....	79
Anexo I - Valores de IT obtidos com a ferramenta P05.....	79
Anexo J - Valores de IT obtidos com a ferramenta P15.....	79
Anexo K - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P05 ($v_c=300$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).	80
Anexo L - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P15 ($v_c=300$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).	80
Anexo M - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P05 ($v_c=150$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).	80
Anexo N - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P15 ($v_c=150$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).	81
Anexo O - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P05 ($v_c=150$ m/min, $a=0,05$ mm/rot, $p=1$ mm).	81
Anexo P - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P15 ($v_c=150$ m/min, $a=0,05$ mm/rot, $p=1$ mm).	82

LISTA DE ACRÓNIMOS

a	Avanço de corte
AISI	“American Iron and Steel Institute”
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio (Alumina)
C	Carbono
cm ³ /min	Centímetro cúbico por minuto
CNC	“Computer Numerical Control”
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cr	Crómio
CVD	“Chemical Vapour Deposition”
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
et al.	e outros (do Latim et alii)
FANUC	“Fujitsu Automated Numerical Control”
GPa	Giga Pascal
ISO	“International Organization for Standardization”
IT	Tolerância Internacional
K	Constante de Taylor
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro
mm/rot	Milímetros por rotação
Mn	Manganês
Mo	Molibdénio
MPa	Mega Pascal
MQL	“Minimal QuantitY of Lubrification”
N	Nitrogénio
Ni	Níquel
P	Fósforo
p	Profundidade de corte
PVD	Physical Vapour Deposition
Ra	Rugosidade média aritmética
rpm	Rotação por minuto
Rt	Amplitude máxima da rugosidade

R _{ta}	Rugosidade média aritmética teórica
R _{tt}	Amplitude máxima da rugosidade teórica
S	Enxofre
Si	Silício
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
V	Vanádio
V _B	Desgaste de flanco (Desgaste da face de saída)
V _{Bmáx}	Desgaste de flanco máximo
v _c	Velocidade de corte
W	Watt
γ	Ângulo de ataque da ferramenta
χ	Ângulo de posição da ferramenta
r _ε	Raio de curvatura da ponta
α	Ângulo de saída
λ	Ângulo de inclinação
°C	Graus Celsius

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A alta eficiência económica obtida devido ao uso dos aços endurecidos para moldes de injeção de plásticos, tem vindo a aumentar esse mesmo uso. Regra geral, este tipo de aço é utilizado em moldes de grandes dimensões ou em moldes de produção moderada, e uma das vantagens para esta indústria ao usar estes aços prende-se com o facto de não precisarem de tratamento térmico. Hoje, cerca de 80% dos aços para moldes são endurecidos geralmente até 40 HRC. Este limite de dureza é necessário para se obter uma boa maquinabilidade, que é, entre outras propriedades, uma das mais importantes referentes aos aços para moldes. A maquinabilidade é a propriedade que tem maior influência no custo do molde, dado que 60% desse custo está associado à sua maquinagem. Assim, a maquinabilidade dos aços endurecidos, tem vindo a tornar-se um aspeto de grande interesse por parte dos fabricantes de moldes para injeção plástica.

Os materiais mostram propriedades muito diferentes quando maquinados através de vários processos de fabrico, portanto a sua maquinabilidade varia amplamente dependendo das condições de corte e do tipo de opção de maquinagem (Hoseiny *et al.*, 2012).

A maquinagem de moldes e matrizes tem vindo a ganhar espaço de destaque no setor da manufatura na medida em que a economia mundial avança na direção da redução de lotes, configurações do produto ao cliente, grande diversidade de produtos, redução do seu tempo de vida e principalmente redução do tempo dos lançamentos de novos produtos. De uma forma sucinta, a maquinagem dos moldes e matrizes tem beneficiado face às características da sociedade baseada de consumo que observamos hoje.

Desde há muito tempo, engenheiros e investigadores têm vindo a perceber que para otimizar o desempenho da maquinagem de aços a nível económico, é necessário criar um modelo que estabelece a ligação entre o grupo de parâmetros de entrada e variáveis de saída, necessários ao processo de maquinagem (Armarego and Brown, 1969).

Os moldes têm pormenores geométricos específicos baseados no perfil das peças que lhe vão ser injetadas. Esses mesmos pormenores representam um desafio para o setor de fabrico do molde. O mercado deste, tende, a cada dia, a ser mais competitivo, o que

requer constante contacto com a inovação tecnológica por parte das empresas deste setor. As peças fabricadas nesta indústria têm de ser feitas com qualidade extrema, já que a liderança de mercado depende exclusivamente de preços baixos juntamente com qualidade (Vivancos *et al.*, 2004).

A indústria dos moldes para injeção de plásticos é um setor económico que ganhou enorme vantagem com o aumento da utilização do plástico. Qualquer objeto de plástico terá de ser fabricado por um molde de aço. A produtividade da injeção de plásticos está diretamente ligada ao “design” do molde e aos seus pormenores geométricos.

A maquinagem das cavidades de um molde representa uma grande parte da sua manufatura, sendo assim necessária a sua otimização para uma redução de custos. Este aspeto afeta não só os fabricantes de moldes, mas também os seus fornecedores (Calvez *et al.*, 2001).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

A maquinabilidade de um material não é só uma característica inerente ao mesmo. Na verdade depende de fatores externos ao próprio material, nomeadamente das características das ferramentas com que é maquinado e das variáveis resultantes do processo de corte em que entram em contacto, tanto forças que daí advêm como temperaturas. Outro fator a ter em conta, é a forma da apara resultante do processo de corte do material em estudo. Após este estar concluído, também será sempre necessário avaliar a precisão dimensional e acabamento superficial das peças utilizadas, para melhor avaliar a sua maquinabilidade. Aqui surgem como fulcrais as medições da rugosidade à superfície dessas mesmas peças.

Considerando o contexto apresentado, os objetivos do presente trabalho incidem principalmente na avaliação de quatro fatores relativos à avaliação da maquinabilidade de um material metálico:

- Acabamento superficial e precisão dimensional dos provetes maquinados;
- Apara resultante dos ensaios de corte;
- Desgaste das ferramentas utilizadas nos ensaios;
- Forças e temperaturas envolvidas no processo de corte.

Concretamente, este estudo tem como principal objetivo a avaliação da maquinabilidade do aço AISI P20 recorrendo a torneamento cilíndrico exterior, utilizando duas ferramentas recentes. Ambas são ferramentas de carbonetos sinterizados, estando a sua principal diferença no seu substrato. Este garante maior resistência ao desgaste à ferramenta P05 e maior tenacidade à P15. As duas contêm revestimento multicamada de TiCN, Al₂O₃ e TiN.

Pretende-se avaliar o desempenho destas ferramentas ao nível do desgaste, e compará-los, obtendo curvas de vida utilizando o modelo de Taylor. A fim de poder avaliar os outros fatores também se pretende recolher e classificar a apanhada após os ensaios de corte, prever valores das forças e temperaturas envolvidas no processo, e efetuar medições da rugosidade da superfície do provete maquinado. Para tudo isto serão variados os parâmetros de corte entre vários ensaios para obter o melhor cenário possível de maquinagem do aço em estudo, bem como, o uso de fluido de corte no caso dos ensaios curtos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação de mestrado é composto por cinco capítulos.

No **Capítulo 1** é feita uma breve introdução acerca do tema a explorar, bem como uma descrição da área onde se inclui o mesmo.

No **Capítulo 2** está presente a revisão bibliográfica da análise da maquinabilidade de aço AISI P20. Aqui foram consultados e posteriormente apresentadas metodologias, bem como resultados de trabalhos já efetuados anteriormente.

No **Capítulo 3** apresenta-se a metodologia utilizada no procedimento experimental. A escolha dessa metodologia foi feita com base do que foi recolhido no capítulo 2. É necessário apresentar todos os detalhes como o aspeto dos provetes do material a maquinar, os parâmetros a utilizar nos ensaios, o planeamento dos mesmos (estratégia de corte), como se deve proceder para obter os resultados da caracterização da superfície e outras variáveis em estudo.

No **Capítulo 4** encontram-se todos os resultados obtidos da componente experimental. Este capítulo incide em duas áreas, sendo elas, os ensaios de corte curtos e os ensaios de corte longos. São apresentados todos os resultados inerentes a cada tipo

de ensaio: tipo de aparas resultantes, rugosidade da superfície dos provetes, desgaste de vida da ferramenta, e previsão das forças e temperaturas envolvidas no processo de corte.

No **Capítulo 5** apresentam-se todas as conclusões retiradas do trabalho efetuado, bem como todos os aspetos de possível interesse relativamente a trabalhos futuros associados à presente dissertação.

2 MAQUINABILIDADE DO AÇO AISI P20 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

O aço 40 CrMnNiMo 8-6-4 (AISI P20), comercialmente conhecido como PM300 é um aço de construção com principal aplicação em moldes de injeção plástica. Foi desenvolvido a partir do aço 40 CrMnMo 7, sendo este o modelo “standard” para este tipo de aços. As características do aço AISI P20 tornam-no melhor para moldes com dimensões maiores comparativamente ao aço de onde deriva. Em relação a este e, falando em termos de composição química, a principal diferença reside na adição de 1.2% de níquel endurecendo-o significativamente.

2.1.1 Composição química

Na Tabela 2.2 encontra-se a composição química dos aços mais utilizados na indústria de moldes para injeção de plásticos. Os valores apresentados são uma média entre as respetivas percentagens de cada elemento presente nesses mesmos aços.

Tabela 2.1 - Composição química dos aços mais utilizados na indústria de moldes (Buderus, 2010)

AISI	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)	V(%)
P20	0.38	0.30	1.50	0.020	0.003	2.00		0.20	
P20 + Ni	0.36	0.30	1.50	0.020	0.003	2.00	1.00	0.20	
P20 + S	0.38	0.30	1.50	0.020	0.070	2.00		0.20	
6F2	0.52	0.20	0.70	0.020	0.002	0.75	1.75	0.30	0.10
6F7	0.45	0.25	0.30	0.025	0.003	1.30	4.00	0.25	
H11	0.35	0.30	0.40	0.010	0.003	5.00		1.35	0.50
H13	0.43	1.20	0.50	0.030	0.030	5.50		1.50	1.10
420	≈0.39	≤1.00	≤1.00	≤0.03	≤0.03	≈13.50			
422	0.28	0.30	0.95	0.030	0.003	14.2	0.50	1.10	

Cada componente químico dos aços tem funções diferentes. No caso do AISI P20 as principais funções dos seus elementos são (Costa, 2008):

O níquel aumenta a resistência ao impacto, bem como a resistência à corrosão. Se for adicionado em grande quantidade pode obter-se uma liga com coeficiente de expansão térmica próximo de zero. Além do níquel, este aço tem também como principais componentes o crómio, o manganês e o molibdénio.

Relativamente ao manganês, este atua como agente dessulfurante e desoxidante. Aumenta também a dureza e a resistência e baixa a temperatura de transformação da martensite. Quando adicionado a um aço em grandes quantidades (entre 11 a 14%), é utilizado em ferramentas resistentes ao desgaste.

O crómio aumenta a resistência à corrosão, ao calor e ao desgaste, e é normalmente adicionado no dobro da quantidade em relação ao níquel.

Por último, o molibdénio que atua como refinador de grão, também melhora a resistência à corrosão e abrasão. Sob condições de altas temperaturas aumenta a dureza, e tem ainda o papel de contrabalançar a tendência à fragilidade de revenido.

2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas

As propriedades mecânicas do material que normalmente têm mais influência sobre a maquinabilidade, são a dureza e a resistência do material. Em caso de aumento da dureza, tem-se também um aumento do desgaste abrasivo o que reduz o tempo de vida da ferramenta. No caso de se aumentar a resistência do material, incrementa-se as forças de corte, a energia específica e também a temperatura de corte fazendo com que o material seja mais difícil de maquinar.

O aço AISI P20 é pré-tratado, e de acordo com Soares (2009), diferencia-se da maior parte dos aços aplicáveis no mesmo setor, através da presença de Ni, garantindo desta forma, uma resistência mecânica uniforme até ao núcleo mesmo para espessuras superiores a 400mm. Apresenta também uma elevada tenacidade, boa aptidão para a eletro-erosão, polimento e texturização. No que diz respeito a soldadura, é possível a reparação de pequenos defeitos de maquinagem e modificações nas gravuras dos aços pré-tratados (300HB).

Na Tabela 2.2 podem ser verificadas algumas propriedades mecânicas e físicas do aço em estudo.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas do aço AISI P20 (ThyssenKrupp, 2013), (Meusburger, 2013),(Buderus, 2010)

Propriedades mecânicas e físicas do Aço AISI P20		
Estrutura		Austenítica
Estado		Temperado e Revenido
Densidade (kg/m ³)		7.85x10 ³
Coeficiente de Expansão térmica (10 ⁻⁶ /K)	a 100°C	11.6
	a 500°C	14.3
Condutividade Térmica (W/mK, a 20°C)		34.0
Calor Específico (J/Kg.k, a 20°C)		502
Módulo de Young (GPa)	a 20°C	212
	a 500°C	175
Coeficiente de Poisson		0.27-0.30
Dureza	HB 290-335	

2.1.3 Tratamentos térmicos nos aços de construção

Os tratamentos térmicos têm por objetivo modificar as propriedades dos aços e de outros materiais através de um conjunto de operações que incluem o aquecimento e o resfriamento em condições controladas.

No caso do aço AISI P20 os tratamentos térmicos a que é submetido resumem-se aos recozidos de amaciamento e distensão, à têmpera e ao revenido. Relativamente ao recozido é aplicado entre 720 a 740°C. É feito neste tratamento um arrefecimento lento e controlado, de 10 a 20°C por hora, até cerca de 600°C dentro do forno, depois no ar. O recozido de distensão é efetuado a cerca de 650°, durando entre uma a duas horas após homogeneização da temperatura até ao núcleo da peça. A têmpera tem um estágio que dura de 15 a 30 minutos normalmente entre temperaturas que variam entre 840 a 860°C, sendo o arrefecimento feito no óleo. Após esta fase a dureza do aço ronda os 54 HRc. Quanto ao revenido, já depois da peça ser aquecida lentamente até à temperatura deste tratamento, tem um estágio a 850°C (temperatura de austenitização) (Soares, 2009).

Este aço também aceita tratamentos termoquímicos como a nitruração em banho de sais, plasma ou gasosa e em casos especiais a cementação (880 a 890°C) com têmpera e durezas aproximadas após revenido. Ainda permite serem aplicados alguns tratamentos superficiais como a cromagem dura e a niquelagem, o PVD (ótima adesão de TiN) e CVD (Soares, 2009).

2.1.4 Aplicações

A indústria tem vindo a usar cada vez mais o aço de construção, tanto em Portugal como no resto do mundo. As aplicações mais comuns para o este tipo de aços resumem-se à indústria de plásticos, mais concretamente em moldes para injeção de plástico.

O aço AISI P20 em particular, pode também ser aplicado em ferramentas de estampagem ou ferramentas para compressão, entre várias outras sendo estas as principais. Dentro da indústria de moldes, tem a particularidade de ser aplicado nas ferramentas de grandes dimensões, geralmente moldes com espessura superior a 400mm (Soares, 2009). Este tipo de moldes, regra geral, destinam-se ao fabrico de vários componentes de dimensão relativamente grande, presentes no dia-a-dia da sociedade como os casos de para-choques, contentores, grades, placas de televisão, painéis de controlo, etc.

A grande diferença do aço em estudo para aço que lhe dá origem, deve-se essencialmente à adição de níquel. O níquel é utilizado para aumentar a dureza do aço, a sua resistência ao impacto e a sua ductilidade, como é o caso da liga crómio-níquel-molibdénio. Esta liga é útil na produção de aços inoxidáveis austeníticos e é também usada para cementação no fabrico de engrenagens, eixos, cremalheiras, coroas, pinhões, terminais de direção, capas de rolamentos eixos e componentes aeronáuticos (Tinken, 2013).

2.2 MAQUINAGEM DO AÇO DE CONSTRUÇÃO AISI P20

2.2.1 Corte por arranque de aparas

O corte por arranque de aparas é um dos processos mais utilizados na produção de peças com formas e dimensões específicas, onde se remove material indesejado e/ou desnecessário. Devido à sua importância na indústria e ao seu uso recorrente, este processo tem sido alvo de estudo desde os anos 40. Desde então têm sido desenvolvidos modelos capazes de prever o comportamento das peças a maquinar durante o corte por arranque de aparas.

O processo está representado na Figura 2.1. O caso geral do corte por arranque de aparas é ilustrado na Figura 2.1a) onde a ferramenta possui uma determinada obliquidade em relação ao movimento sobre a peça a maquinar, pelo que neste caso é denominado de

corte obluo. Um caso especial deste processo ocorre quando a superfície da face de ataque da ferramenta de corte é perpendicular  direção de corte (Figura 2.1b)). Este caso em particular é chamado de corte ortogonal (Merchant, 1944).

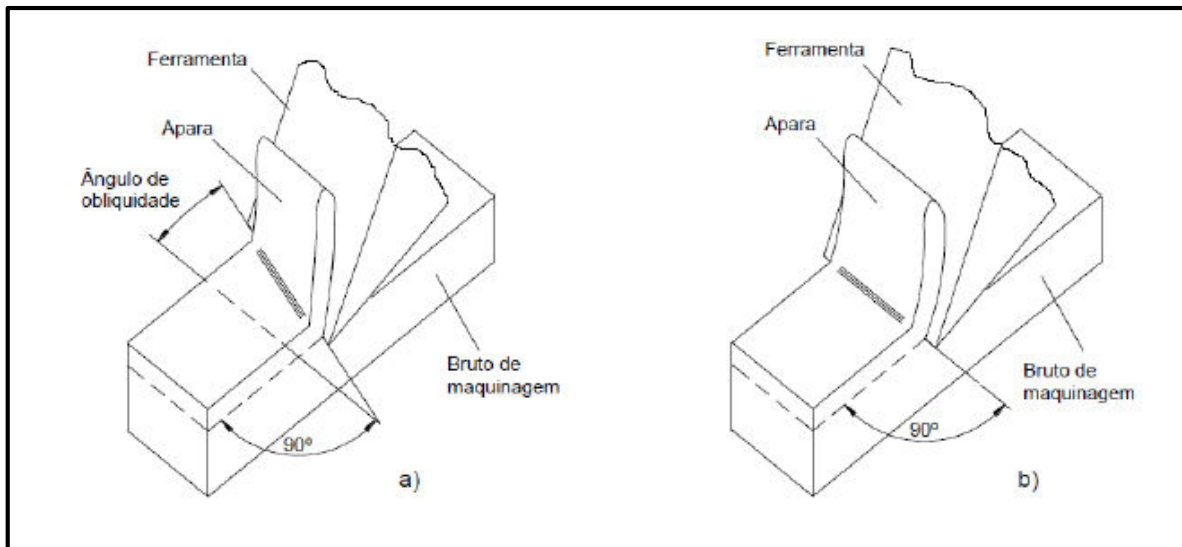


Figura 2.1 -Representação esquemática do corte por arranque de aara; a) Corte Obluo; b) Corte Ortogonal (Merchant, 1944)

2.2.2 Parâmetros de corte

O corte de metais é um dos importantes e usados processos de fabrico na indústria. O estudo deste processo foca-se nos recursos das ferramentas, a composição do material de trabalho, nas suas propriedades mecânicas e, acima de tudo, nos parâmetros de corte. Estes últimos irão influenciar a eficiência do processo e a qualidade dos produtos. Pode obter-se uma melhoria da eficiência do processo através da otimização dos parâmetros de corte reduzindo ao mesmo tempo os custos de fabrico mantendo a qualidade desejada nos produtos (Montgomery (1997) citado por Davim and Correia, 2006)).

2.2.3 Ferramentas de corte

A seleção de materiais adequados  execução de ferramentas de corte por arranque de aara é muito importante na realização de uma operação de maquinagem eficiente, não são em termos tecnológicos como em termos econmicos. Uma má escolha do material pode conduzir à deterioração da ferramenta e da peça a fabricar, originando custos de produção desnecessários (Davim and Correia, 2006).

A maquinagem de moldes e matrizes tem vindo a ganhar espaço de destaque no setor da manufatura visto que a economia mundial tende para a redução de lotes, grande diversidade de produtos de modo a configurar o produto ao cliente, redução do tempo de vida juntamente com a urgência no lançamento de novos produtos, em suma as características de uma sociedade de consumo (Helleno, 2004).

Como foi verificado na literatura, as ferramentas mais utilizadas na maquinagem de aços da família AISI P20, são de carbonetos sinterizados. Hoje em dia, este tipo de ferramentas já é mais utilizado que os aços rápidos como ferramentas de corte, fator que se deve à maior vida da ferramenta, algo entre 13 a 15 vezes mais (Alves, 2005), velocidades de corte até duas vezes superior, melhor acabamento superficial e maior taxa de remoção da avara.

O aparecimento de técnicas de revestimento (primeiro a deposição química em fase de vapor – CVD e em seguida a deposição física em fase de vapor – PVD) revolucionou a tecnologia dos carbonetos sinterizados, dado que permitiu revestimentos com boas propriedades mecânicas (Fernandes (2002) citado por (Davim and Correia, 2006)). As técnicas de revestimentos múltiplos (deposição em fase de vapor) são utilizadas para promover uma maior aderência do revestimento ao substrato. São exemplos destes revestimentos o nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e a alumina (Al_2O_3), entre outros (Glaeser, 1992).

Na literatura consultada Sandvik Coromant (2012), as ferramentas sugeridas inserem-se maioritariamente na classe P (P5, P15, P25 e P35), mas algumas também se encontram na classe M, nomeadamente para maquirar aços endurecidos com durezas na ordem dos 330 HB. Os revestimentos mais usados são efetuados com auxílio das tecnologias PVD e CVD, sendo que a tanto num como noutro caso a camada mais usual é de TiN, seguidamente de Al_2O_3 e TiCN.

Os revestimentos CVD têm funções ligeiramente diferentes de quando aplicados com auxílio de PVD. A camada de alumina (Al_2O_3) é quimicamente inerte e tem baixa condutividade térmica tornando a pastilha resistente em relação ao desgaste de cratera, enquanto que a a camada de carbonitreto de titânio (TiCN) oferece maior resistência ao desgaste abrasivo reduzindo também o desgaste do flanco. O nitreto de titânio (TiN) aumenta a resistência ao desgaste, sendo sempre a camada mais superficial o que a torna na camada detetora do próprio desgaste. O substrato é otimizado de modo a obter uma máxima resistência à deformação sem perder robustez (Sandvik Coromant, 2012).

As ferramentas compostas por carbonetos sinterizados (metais duros), desenvolvidas para possibilitar a maquinagem com velocidades de corte mais elevadas e viabilizar taxas de produção mais elevadas, podem apresentar problemas. Atualmente, este tipo de ferramenta é responsável por 70% do mercado de ferramentas para maquinagem (Galoppi et al., 2005).

2.2.4 Fluidos de Corte

Hoje em dia, existem vários aspetos condicionantes na utilização de fluidos de corte lubrificantes, nomeadamente de índole ecológica.

Os fluidos de corte utilizados para maquinar metais, têm influência no desempenho das operações de maquinagem devido à sua lubrificação, arrefecimento e lavagem da peça maquinada, mas o uso desses fluidos tem vindo a mostrar-se problemático para a saúde dos trabalhadores desta área, bem como para a poluição do meio ambiente (Pusavec, Krajnik and Kopac, 2010).

Nos últimos anos, o consumo de energia, a poluição e os resíduos industriais têm despertado especial atenção por parte das autoridades públicas. O meio ambiente tornou-se um dos assuntos mais importantes dentro do contexto atual, pois a sua deterioração terão consequências para a população. Motivados pela pressão dos órgãos ambientais, os parlamentos têm elaborado leis cada vez mais rigorosas no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos. Todos estes fatores têm influenciado as indústrias, centros de pesquisas e universidades a pesquisarem processos de produção alternativos, criando tecnologias que minimizem ou evitem a produção de resíduos que agridam o meio ambiente.

Até há relativamente pouco tempo, as indústrias tinham como objetivo principal o fabrico de produtos visando satisfazer aspetos tecnológicos e económicos. Atualmente, esse objetivo tem também o componente ambiental como destaque.

Em função destas questões (económicas, ambientais e tecnológicos) tem havido no segmento industrial uma busca por alternativas que possam substituir o uso de fluidos de corte na maquinagem de metais (Klocke and Eisenblatter, 1997). Entre elas, destaca-se a maquinagem a seco e a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) (Silva et al., 2004).

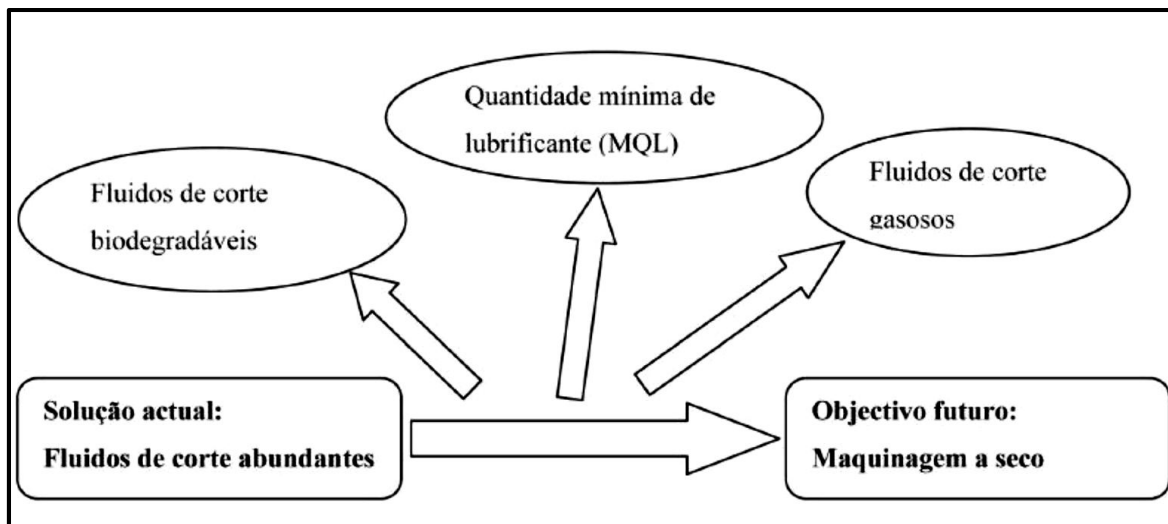


Figura 2.2 - Evolução da maquinagem com fluidos de corte (Davim and Correia, 2006)

Entre os aspetos positivos da maquinagem a seco está a diminuição do choque térmico. Há também o facto das aparas obtidas já estarem secas e prontas a ser vendidas ou recicladas, ao contrário das obtidas em maquinagem com uso de lubrificante, que requerem processamento e filtração (Klocke and Eisenblatter, 1997).

Os materiais usados no fabrico de ferramentas para maquinar a alta velocidade, estão sujeitos a altas temperaturas, devendo conservar a sua dureza nestas condições. Daí que se utilizem essencialmente ferramentas de metal duro e cerâmicas. Estas ferramentas são utilizadas para maquinar a seco. A utilização de fluidos de corte poderia originar choques térmicos e provocar a fissuração do material da ferramenta (Davim and Correia, 2006).

Na bibliografia consultada, a grande maioria dos testes com aço da família AISI P20 foram efetuados a seco, salvo raras exceções em que se utilizou lubrificante/MQL (Minimal Quantity of Lubrificant).

2.2.5 Condições de corte testadas

Na Tabela 2.3 são apresentados os detalhes dos ensaios de corte efetuados por diversos autores, usando aços de construção ligados da família AISI P20. Entre esses detalhes estão o tipo de corte, os seus parâmetros, o material concretamente usado, o regime em que o ensaio foi feito e também as ferramentas de corte.

Tabela 2.3 - Parâmetros de corte utilizados em outros trabalhos

Autor	Material	Ferramenta	v_c (m/min)	a (mm/rot)	p (mm)
Furação					
Oliveira (2010)	AISI P20	Carboneto com TiN/AlTiCN/AlTiCrN	40	0.1	18
Zeilmann <i>et al.</i> , (2011)	AISI P20	Carboneto com TiAlN (DIN 6537 K)	50	0.10	25.50
Fresagem					
Hoseiny <i>et al.</i> , (2012)	AISI P20	Carboneto sinterizado revestido em PVD com TiAlN (Coromant R390-11 T3 08M-PL 1030)	120 160 200	0.20	1.00
Hossein <i>et al.</i> , (2007)	AISI P20	Carboneto Sinterizado revestido em PVD com TiN (KC735M)	100 140 180	0.10 0.15 0.20	1.0 1.5 2.0
Rech (2004)	AISI P20+S	Carboneto sinterizado (RPHW 1204, P30)	150 262 300	0.10 0.28 0.35	1 4 5
Fallböhmer <i>et al.</i> , (2000)	AISI P20	Carboneto sinterizado com TiN/TiCN/TiAlN (PCBN2)	300, 550 800	0.5	0.5
Torneamento					
Gupta <i>et al.</i> , (2011)	AISI P20	Carboneto de tungstênio com TiN (CNMG12 04 04)	120 160 200	0.10 0.12 0.14	0.20 0.35 0.50
Stoic <i>et al.</i> , (2005)	AISI P20	Cerâmica com TiC (CBN 25)	450 600	0.1 0.2	0.20 0.35
Bhuiyan <i>et al.</i> , (Bhuiyan, Choudhury and Dahari, 2014)	AISI P20+Ni	Carboneto de tungstênio com TiN (SNMG 12 04 08-PM)	170 215 250 270	0.2 0.28 0.32 0.5	0.5 1.2

2.3 MAQUINABILIDADE

A maquinabilidade de um material (capacidade para ser processado por maquinagem) é um fator com enorme influência sobre a produtividade, e encontra-se relacionado com a resistência oferecida ao corte em ensaios de corte de longa ou curta duração (Collins *et al.*, 2011).

Para se definir o conceito de maquinabilidade da forma mais correta, é fundamental ter em consideração inúmeros fatores (Figura 1-8). O índice de maquinabilidade obtém-se comparando os resultados obtidos com um material padrão cuja maquinabilidade é convencionalmente igual a 100 (AISI B-1112 – aço de corte fácil) (Wright and Trent, 2000).

A maquinabilidade não é uma propriedade específica de um material, é sim um modo de comportamento do material quando submetido a um corte e a avaliação da maquinabilidade deve, portanto, especificar as condições de corte válidas para maquinar o material em questão (Šalák et al., 2005). Na realidade, a maquinabilidade é a manifestação da interação entre a peça do material a maquinar e a ferramenta submetida pelo poder da máquina.

A definição de maquinabilidade de um material é a maior ou menor facilidade com que o material se pode maquinar por arranque de apana e pode definir-se convencionalmente em função de quatro critérios (Kalpakjian and Schmid, 2002):

- Acabamento e integridade de superfície da peça;
- Desgaste da ferramenta;
- Controlo da apana obtida;
- Força e potência de corte.

A avaliação de maquinabilidade é feita com recurso a ensaios de corte que não se encontram normalizados, de longa ou de curta duração. Os primeiros são efetuados em condições perfeitamente idênticas de contacto peça/ferramenta em operações de corte. Os segundos devem fornecer informações num curto intervalo de tempo a um custo mínimo. Enquanto na indústria se utilizam com maior frequência os ensaios de curta duração, sempre menos precisos, na investigação recorre-se sobretudo aos de longa duração (Ferraresi, 1977, Mesquita R.M. et al., 1989).

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 and Correia, 2006).

2.3.1 Forças de Corte

A força de maquinagem é designada como a força que atua sobre a ferramenta durante o processo de corte (Davim, 2008). Esta força projeta-se sobre os movimentos de

corte, de avanço e de penetramento. A força projetada sobre o movimento de corte designa-se por F_c (ou F_z), a de penetramento F_p (ou F_x) e a de avanço F_a (ou F_y). Na Figura 2.3 encontram-se representadas estas componentes da força de maquinagem.

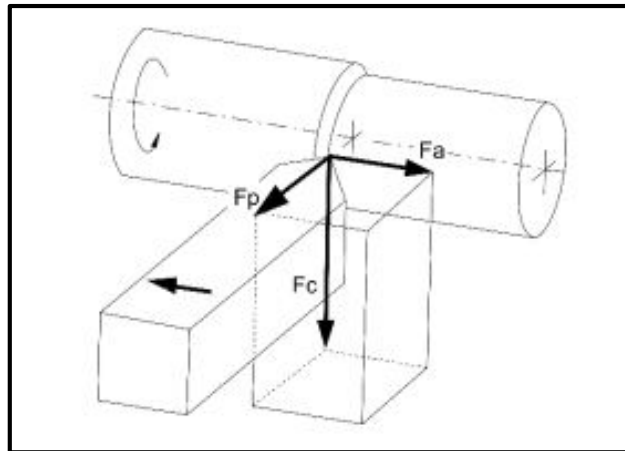


Figura 2.3 - Esquema ilustrativo da força de maquinagem (Klocke and Kuchle, 2011)

Matematicamente, a força de maquinagem é obtida pela norma das suas componentes (F_c , F_p e F_a):

$$F_m = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_a^2} \quad (1)$$

Tem sido verificado que o melhoramento das variáveis de saída como o tempo de vida da ferramenta, as forças de corte, bem como rugosidade da superfície do material a ser maquinado, resultam num melhor desempenho economicamente, no caso de otimização dos parâmetros de entrada como a velocidade de corte, profundidade e avanço (Budak, Altintas and Armarego, 1996).

As forças de corte têm influência, direta ou indireta, no desempenho de outras variáveis, sendo elas o desgaste da ferramenta, as características da superfície do material maquinado e o custo da maquinagem (Abou-El-Hossein *et al.*, 2007) .

Geralmente, na maquinagem de aços com ferramentas de carbonetos, ocorre abrasão, adesão, oxidação e até alguma difusão, cuja atuação é proporcional à temperatura de corte (Usui, (1998) citado por Aneiro *et al.*, (2008)). A tarefa de definir qual destas reações ocorre mais vezes tem vindo a ser bastante complexa. Alguns trabalhos de investigação têm relacionado tais mecanismos à velocidade de corte. Por exemplo, o aumento da temperatura nas zonas de corte ocorre basicamente devido ao aumento da velocidade de corte.

Sahoo (2012) obteve valores das forças de maquinagem envolvidas no processo de corte por arranque de apara, em torneamento do aço AISI 4340 (Figura 2.4), com uma ferramenta revestida com Nitreto de Titânio. É visível que a força da componente Y é claramente superior às outras, sendo portante a parcela com mais influência sobre a força de maquinagem. Neste gráfico a força de avanço está representada por F_y , a força de corte por F_z e a de penetramento por F_x .

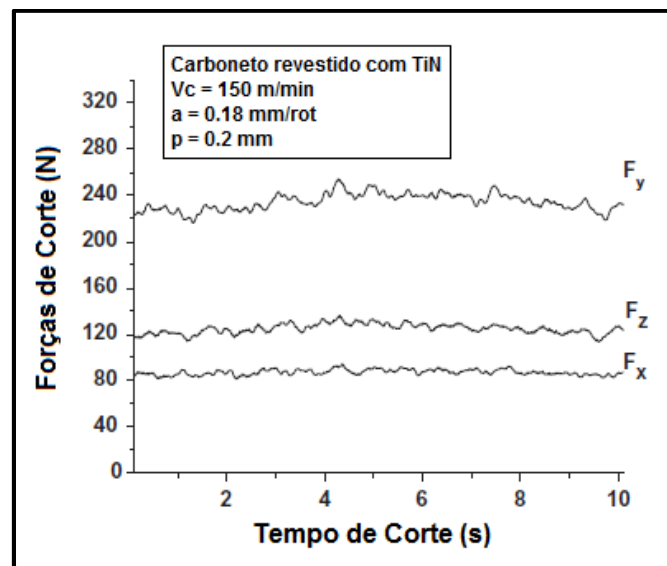


Figura 2.4 –Forças de corte a variar com o tempo de maquinagem da ferramenta (Sahoo and Sahoo, 2012)

2.3.2 Aparas

A formação de apara e sua morfologia são fatores importantes referentes à maquinagem de metais, e também ao processo de corte em si (Sun, Brandt and Dargusch, 2009).

O calor gerado do atrito entre a ferramenta e a apara geralmente limita o desempenho das operações de maquinagem de metais (Zeilmann *et al.*, 2011).

A apara pode apresentar-se, fundamentalmente, sob quatro tipos (Groover M.P., 2002 citado por Davim e Correia (2006)):

- Descontínua (ou de rotura), característica de materiais frágeis e de maquinagem a baixas velocidades;
- Contínua regular, característica de materiais dúcteis e do corte a médias e elevadas velocidades;

- Contínua irregular (com aderências), característica e de materiais dúcteis maquinados a baixas velocidades de corte com e sem lubrificação;
- Serrilhada, ou segmentada, devido à sua semelhança com os dentes de serra. A sua formação resulta da alternância entre tensões de corte elevadas e baixas. Está associada à maquinagem de ligas à base de níquel e aços austeníticos a altas velocidades. Surge também durante a maquinagem dos metais comuns quando maquinados a alta velocidade.

A Figura 2.5 mostra os tipos de apara segundo Groover (2010): descontínua, contínua regular, contínua irregular e serrilhada.

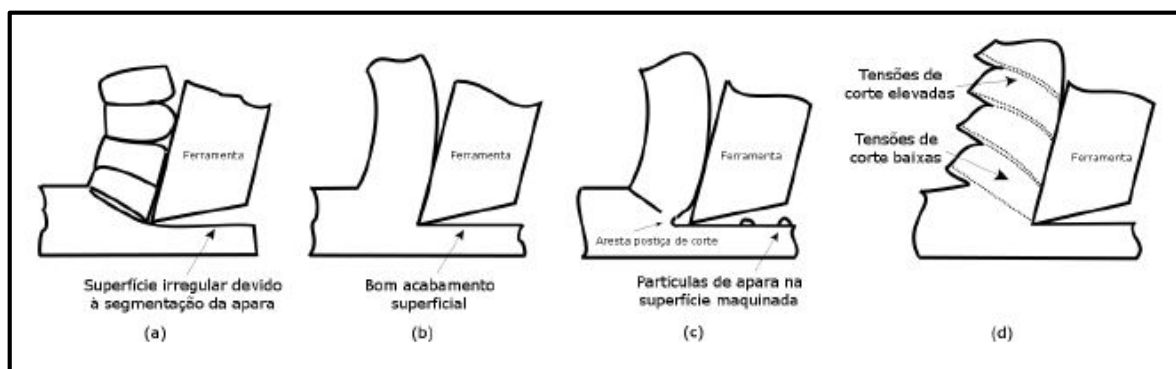


Figura 2.5 -Tipos de apara segundo Groover (2010) : a) descontínua, b) contínua regular, c) contínua irregular, d) serrilhada

A mudança de forma da apara pode efetuar-se modificando as condições de corte ou dando uma forma especial à face de ataque da ferramenta de corte, ou seja, utilizando quebra- aparas. A alteração das condições de corte no sentido do aumento da capacidade de quebra da apara deve conduzir a um aumento da deformação da apara no plano de corte, o que pode conseguir-se diminuindo o ângulo de ataque e o ângulo de inclinação da aresta da ferramenta de corte (usando eventualmente valores negativos), e aumentando a espessura da apara e reduzindo a velocidade de corte (Ferraresi (1977) citado por Davim e Correia (2006)). No entanto, segundo Davim e Correia (2006)., a mudança das condições de corte de modo a obter uma forma adequada da apara deve ser tanto quanto possível evitada. A diminuição dos ângulos referidos aumenta a força de maquinagem, podendo ocasionar vibrações. A velocidade de corte e o avanço devem ser fixados pelas condições económicas de maquinagem. Assim, a solução passa pela utilização de quebra- aparas na face de ataque das ferramentas, o que permite obter aparas curtas.

Bhuiyan, Choudhury and Dahari, (2014) ao maquinarem aço AISI P20, obtiveram essencialmente aparas helicoidais. Nos seus ensaios foram utilizadas velocidades com

valores compreendidos entre 170 e 250m/min e avanços entre 0,2 e 0,5mm/rot. A profundidade foi constante ao longo dos ensaios (1mm).

2.3.3 Desgaste das ferramentas

As ferramentas de corte utilizadas em torneamento duro são muito mais caras que as utilizadas em torneamento convencional, portanto, o seu tempo de vida deve ser estudado e aumentado para assegurar que o investimento é justificável, no sentido de substituir as operações convencionais por torneamento duro (Dawson and Kurfess, 1995).

O limite do aumento da velocidade de corte depende de vários fatores, tais como a combinação ferramenta-peça de trabalho, o contacto entre as mesmas e a presença ou não de fluidos de corte. Um determinado revestimento de uma ferramenta, geralmente, é justificável com a sua relação com a velocidade de corte. No entanto, em alguns casos, este aspeto depende mais da superfície de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho (Arsecularatne *et al.*, (2005) citado por Aneiro *et al.*, (2008)).

Bhuiyan, Choudhury and Dahari (2014), maquinaram aço AISI P20 com recurso a ensaios de torneamento. Para tal utilizaram ferramentas de carbonetos sinterizados revestida com uma camada de TiN com geometria do tipo SNMG 12 04 08-PM. Foi necessário a ferramenta chegar a 55 minutos de vida para atingir um V_B de 0.3mm (ver Figura 2.6). De facto até chegar a 0.2 de V_B , a ferramenta mostra desgastar-se muito lentamente tendo chegado a esta marca já após torneiar durante cerca de 50 minutos.

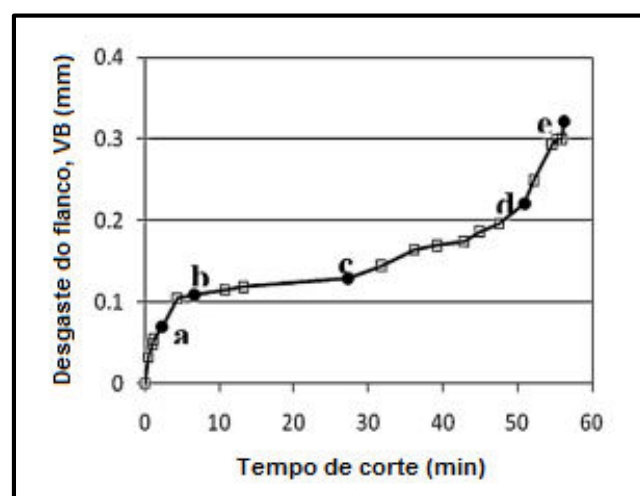


Figura 2.6 - Desgaste do flanco em função do tempo de vida (Bhuiyan, Choudhury and Dahari, 2014)

Num outro teste, Chinchankar and Choudhury (2013) utilizaram dois tipos de revestimento em ferramentas de corte para tornear aço AISI 4340. Uma das ferramentas tinha revestimento a CVD com multicamada (TiCN, Al₂O₃ e TiN) e a outra a PVD com apenas uma camada de TiAlN. Com a variação da velocidade de corte, avanço e profundidade, os autores obtiveram o tempo de vida para as duas ferramentas e compararam-nas, sendo os resultados do histograma na Figura 2.7 conclusivos quanto à pastilha que duraria mais.

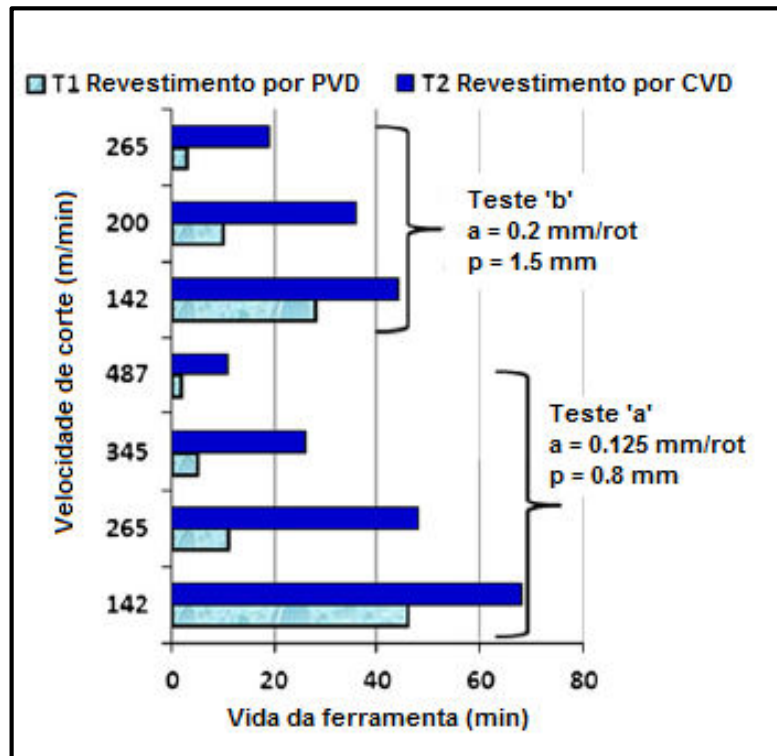


Figura 2.7 – Comparação do tempo de vida das ferramentas utilizadas por Chinchankar and Choudhury (2013) para os parâmetros testados

Os mesmos autores elaboraram um gráfico (Figura 2.8) que mostra o desgaste do flanco em função do tempo de corte e mais uma vez chegaram à conclusão de que a ferramenta revestida a CVD é claramente melhor quanto à resistência ao desgaste.

Sahoo and Sahoo (2012) compararam o tempo de vida de duas pastilhas de carbonetos sinterizados, uma revestida com TiN e outra com ZrCN, em ensaios de torneamento de aço AISI 4340. Os resultados foram esclarecedores, pois o revestimento a TiN fez com que a ferramenta atingisse um V_B de 0.3mm em mais de 19 minutos, ao passo que a ferramenta revestida com ZrCN atingiu o mesmo V_B em apenas 8 minutos de tempo de corte. Também efetuou

ensaios com uma ferramenta sem revestimento, tendo esta atingido o mesmo desgaste de flanco em menos de um minuto.

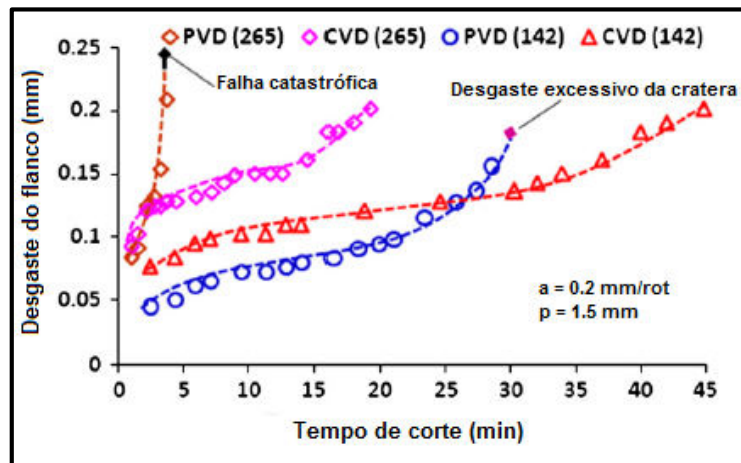


Figura 2.8 - Evolução do desgaste em função do tempo de corte para as pastilhas em estudo (Chinchanikar and Choudhury, 2013)

2.3.4 Rugosidade da superfície/precisão dimensional

O constante progresso na área industrial exige métodos altamente eficazes na obtenção de produtos cada vez mais sofisticados, pois as tolerâncias no processo de fabrico são cada vez menores. As superfícies dos produtos por mais perfeitas que sejam, apresentam sempre irregularidades resultantes do método da sua obtenção, seja por torneamento, fresagem ou outro tipo de maquinagem (Mitutoyo, 2009). Neste contexto a rugosidade superficial é um fator determinante em propriedades tais como capacidade de retenção de lubrificantes, atrito entre partes em contato, capacidade de carga em rolamentos e resistência ao desgaste principalmente. Diante deste facto, a engenharia de produto deve decidir entre uma série de parâmetros de caracterização de rugosidade superficial que deve, portanto, atender aos requisitos funcionais bem como obter maior desempenho dos produtos.

Alguns dos fatores mais importantes nos quais a rugosidade superficial tem influência são (Mitutoyo, 2009):

- Aumento da resistência ao desgaste em guias de máquinas-ferramentas. No contacto entre duas superfícies, apenas uma está realmente a tocar na outra. Em caso de rugosidades muito elevadas, a área de distribuição de carga pode ficar limitada provocando um aumento excessivo no desgaste;

- Manutenção da camada de lubrificante. As superfícies muito rugosas podem ultrapassar caso tenham picos muito elevados, a camada de lubrificante que previne o contacto metal-metal (Figura 2.9).

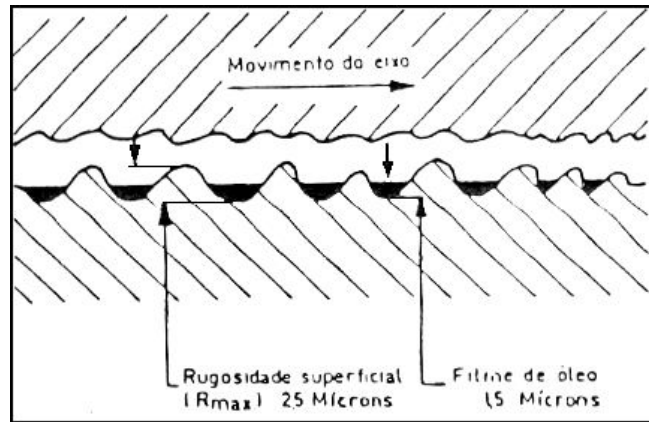


Figura 2.9 – Efeito que a rugosidade (elevada) pode ter no contacto de peças com lubrificante

- Resistência ao lascamento da aresta de corte nas ferramentas de maquinagem. Uma superfície muito rugosa pode levar ao lascamento da aresta de uma ferramenta de corte.
- Influência na transmissão de calor entre duas superfícies, onde observamos que à medida que a rugosidade diminui, o coeficiente de transmissão de calor aumenta, pois tal facto garante maior área de contato.

Segundo Davim (2008) o avanço é o parâmetro mais determinante no acabamento superficial, pois devido à sua influência direta surgem estrias deixadas pela ferramenta de corte. Ao nível da velocidade de corte, esta tende a melhorar o acabamento superficial assim que aumenta. Para velocidades mais baixas dá-se a formação da aresta postiça de corte, o que causa a formação de partículas que aderem à superfície maquinada, degradando-a. A profundidade de corte é a condição que menor influência tem no acabamento superficial. Apenas em alguns casos onde se utiliza profundidades muito reduzidas poderá ocorrer uma recusa de corte, pelo que o gume da ferramenta em vez de arrancar recalca, criando mau acabamento. No que diz respeito ao desgaste da ferramenta, a rugosidade máxima (R_t) varia irregularmente em função do tempo de corte.

O valor de R_t teórico (R_{tt}) é dado pela expressão:

$$R_{tt} = \frac{a^2}{8r} \times 1000 \quad (2)$$

Através de uma expressão idêntica pode-se obter o valor teórico da rugosidade média aritmética (Rta):

$$Rta = \frac{a^2}{32r} \times 1000 \quad (3)$$

A precisão dimensional de uma peça obtida por maquinagem encontra-se intrinsecamente relacionada com a sua rugosidade superficial. Note-se que é com base nas irregularidades superficiais que se definem os graus de tolerância. Estes graus representam-se por intervalos de tolerância (IT) e definem-se desde o grau de maior exatidão (IT01 – classificada como grau muito fino) até ao grau de menor exatidão (IT18 – grau para construção muito grosseira) (Morais, 2006).

É possível relacionar a rugosidade média aritmética (Ra) com a precisão dimensional através da expressão:

$$IT \approx 30 \times Ra \quad (4)$$

Diniz and Coppini (1992) descobriram que de um modo geral a rugosidade média aritmética (Ra) e a rugosidade máxima, tende a aumentar com o desgaste da ferramenta de corte. O gráfico na Figura 2.10 mostra a evolução da rugosidade (Ra e Rt) bem como o desgaste ao longo de toda a distância de corte já percorrida pela ferramenta de corte. Os autores deste trabalho dizem mesmo que geralmente um critério para mudar de ferramenta está relacionado com o excesso de rugosidade (acima do limite estipulado) presente na superfície maquinada.

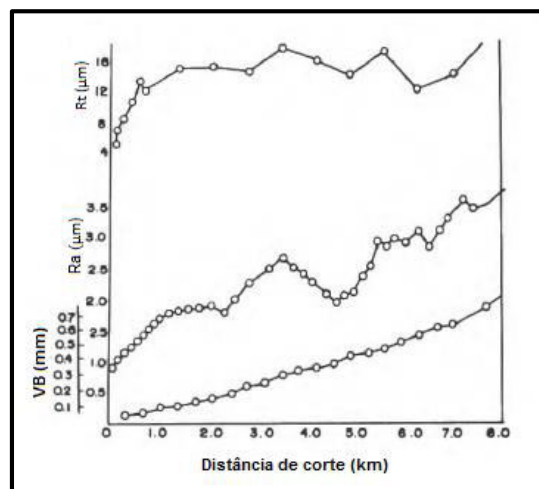


Figura 2.10 – Rugosidade (Ra e Rt) e desgaste (VB) em função da distância de corte feita pela ferramenta (Diniz and Coppini, 1992)

Fallböhmer et al.,(2000) investigaram a influência da velocidade de corte no acabamento superficial em aço AISI P20 com vários revestimentos de ferramentas, incluindo TiN, TiCN, TiAlN e CBN, com avanço de 0,5mm/rot. Os autores observaram que a velocidades de corte muito baixas a superfície tinha um acabamento inaceitável para o produto final, verificando mesmo presença de arestas. Concluíram ainda que a partir de 300m/min o efeito verificado até então desaparecia, para qualquer revestimento.

Uhlmann *et al.* (2013) verificou que a rugosidade à superfície varia bastante com o tempo de vida da ferramenta, não sendo possível no entanto, estabelecer uma tendência clara. O autor efetuou os testes de maquinagem em duas ligas de aço AISI P20+S usando o AISI P20 como referência (Figura 2.11). Uma das ligas tinha maior concentração de carbono (mais duro), e a outra de enxofre.

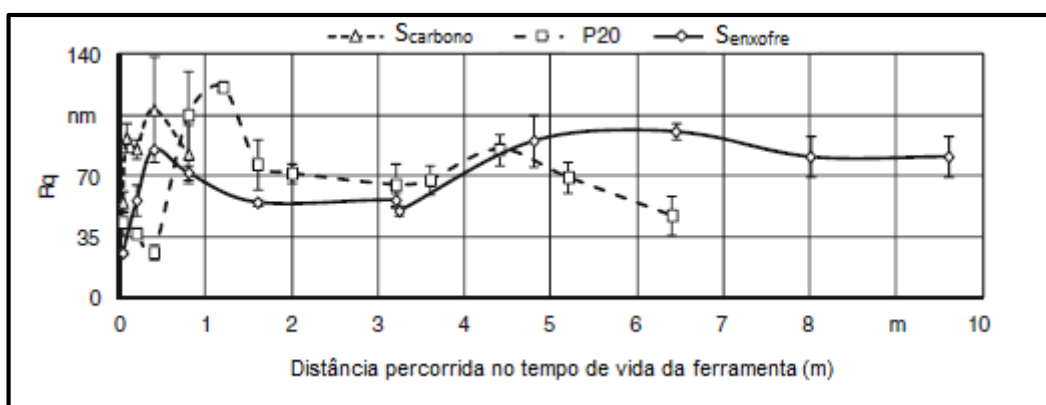


Figura 2.11 – Evolução da rugosidade da superfície durante os testes de tempo de vida da ferramenta (Uhlmann *et al.*, 2013)

Zeilmann et al. (2011) submeteram o aço AISI P20 a testes de furação com e sem fluido de corte, e chegaram à conclusão que a rugosidade (Ra) é substancialmente mais baixa bem como mais homogênea ao longo da profundidade de corte, utilizando fluido, naquele caso MQL.

Schultheiss *et al.* (2014) fizeram variar a rugosidade (Ra) com outro parâmetro: o raio da ferramenta. Neste trabalho, os autores tornearam outro aço ferramenta, o AISI 1045, e ficou claro que a rugosidade superficial tende a decrescer assim que se utiliza uma ferramenta de raio maior. Assim, desenvolveram um novo modelo para rugosidade em função do avanço e raio da ferramenta, porém para um raio de 1,6mm não é completamente fiável.

Sahoo and Sahoo (2012) puseram a rugosidade (Ra) em função do tempo de vida de ferramentas de corte para tornear aço AISI 4340 a seco. Foram utilizadas pastilhas de

carbonetos, uma sem revestimento, outra revestida com TiN e outra com ZrCN. Foi visível que em média, a pastilha revestida a TiN registou valores de Ra abaixo da revestida a ZrCN (Figura 2.12).

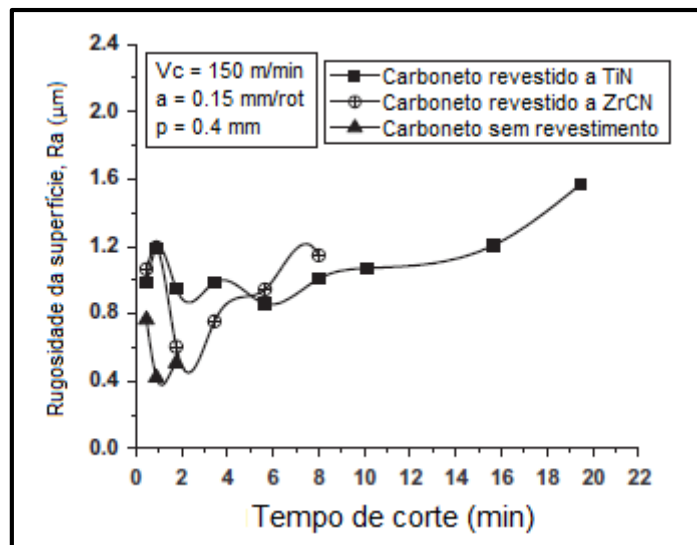


Figura 2.12 – Variação da rugosidade superficial (Ra) com o tempo de vida para ferramentas testadas no torneamento de aço AISI 4340 (Sahoo and Sahoo, 2012)

Chinchanikar e Choudhury (2013) compararam as técnicas de deposição da cobertura a fim de estabelecer a melhor no que toca à escolha de uma ferramenta de corte se se tiver em conta o acabamento superficial, torneando aço AISI 4340. Foi constatado que a cobertura a PVD é a que apresenta rugosidades mais baixas. No entanto, para peças do mesmo aço mas com dureza significativamente maior (de 35 para 45 HRC) a cobertura a CVD tem melhores resultados quanto à qualidade final da superfície do provete.

2.4 SÍNTESE

A análise da maquinabilidade de aços de construção é extremamente importante para a indústria, nomeadamente no setor dos moldes para injeção de plásticos. A influência que esta indústria tem quer a nível nacional quer a nível internacional, tanto económica como tecnologicamente, torna necessária uma criação de condições de corte ótimas no que diz respeito à maquinagem dos aços com melhores características para este setor.

No âmbito do corte por arranque de aparas e através de operações de torneamento, apresentam-se como solução ferramentas de carbonetos sinterizados com alta resistência ao desgaste. Hoje em dia este tipo de ferramentas já é mais utilizado que o de aços rápidos,

por ter muito maior tempo de vida, por permitir velocidades de corte até duas vezes superior e também por apresentar melhor acabamento.

Os fatores que envolvem a maquinagem do aço AISI P20, e de outros aços de construção, têm sido alvo de estudo por vários autores cujos trabalhos foram apresentados no presente capítulo. Esses trabalhos incidiram sobretudo nos parâmetros de avaliação da maquinabilidade, tais como: rugosidade da superfície, tipo e forma das aparas, desgaste das ferramentas de corte, temperatura e força de maquinagem.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo apresentam-se as condições testadas nos ensaios, os equipamentos utilizados, a forma do material a maquinar, as especificações das ferramentas de corte e dos parâmetros de maquinagem, visando facilitar a compreensão da metodologia utilizada, 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 E PROVETES

3.2.1 Material

O material usado neste trabalho de investigação foi o aço de construção ligado AISI P20, fornecido pela empresa F Ramada®, com a composição química descrita na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química do aço AISI P20

Elemento Químico (%)	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S
Máximo	0,42	0,40	1,60	2,25	0,30	1,20	0,010
Mínimo	0,32	0,20	1,25	1,80	0,15	0,85	-

O aço foi tratado antes de fornecido tendo sido endurecido até valores na ordem dos 310 HB. Outras propriedades mecânicas podem ser consultadas na Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do aço tratado AISI P20

Temperatura (°C)	20	200
Densidade (kg/m ³)	7800	7750
Coeficiente de expansão térmica		12.7x10 ⁻⁶
Condutividade térmica (W/m.°C)		28
Módulo de elasticidade (N/mm ²)	205000	200000
Calor específico (J/kg.°C)	460	

3.2.2 Provetes

Antes da realização dos ensaios foi necessário preparar os provetes. O material fornecido tinha a geometria em forma de varão (Figura 3.1) de 210 mm com 51 mm de diâmetro. Foi feito um faceamento nos topos de modo a corrigir o comprimento de todos os provetes, de seguida efetuou-se um chanfro a 45° e realizou-se um sangramento de 3 mm no centro do varão, finalmente efetuou-se a furação dos topos para o apoio do contraponto.

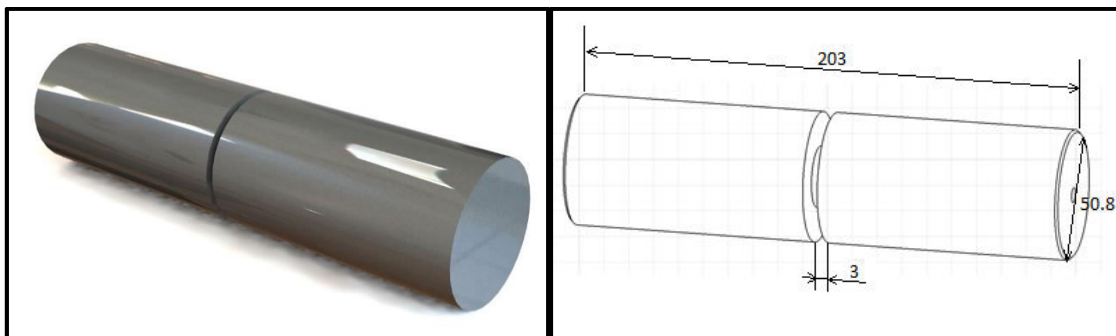


Figura 3.1 – Aspecto dos provetes antes de serem submetidos aos testes de torneamento (esquerda) e suas dimensões (direita)

3.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Para fixar a pastilha de corte neste trabalho foi utilizado o porta-ferramentas DCLNL 2020K 12, com fixação por grampo, da Sandvik (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Porta ferramentas utilizado nos ensaios

Tabela 3.3 – Identificação e geometria de corte das ferramentas utilizadas no trabalho experimental

Ferramenta	ISO	Ângulo de posição $\chi(^{\circ})$	Raio da curvatura da ponta r_{ϵ} (mm)	Ângulo de Saída $\alpha(^{\circ})$
P05	Sandvik CNMG 12 04 08-QM 4205	95	0,8	0
P15	Sandvik CNMG 12 04 08-QM 4215	95	0,8	0

Em todos os ensaios de corte, quer longos quer curtos, foram utilizadas pastilhas de corte de carbonetos sinterizados. As ferramentas de corte em questão (Figura 3.3), QM4205 e QM4215 (P05 e P15), são distintas do ponto de vista do substrato.

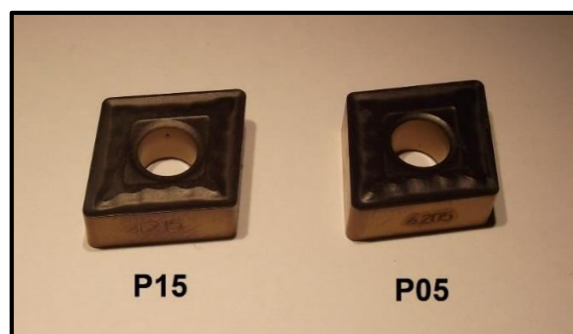


Figura 3.3 - Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios

A pastilha P05 apresenta uma excelente resistência ao desgaste por craterização e deformação plástica, enquanto que a pastilha P15 tem como finalidade o acabamento a desbaste para aços e aços fundidos em aplicações com cortes contínuos a levemente interrompidos.

Ambas as pastilhas possuem um revestimento com 3 camadas: TiCN (carbonitreto de titânio), Al₂O₃ (alumina) e TiN (nitreto de titânio) (ver Figura 3.4). A aplicação dos referidos revestimentos, pela ordem apresentada anteriormente (do substrato para o exterior), é realizada com o recurso à tecnologia de CVD, deposição química em fase de vapor. A QM4205 que se insere na classe P05 tem 18µm de espessura de revestimento, debaixo do qual está um substrato duro com um grão fino que torna a aresta de corte mais robusta. A QM4215 colocada na classe P15 possui 14µm no mesmo revestimento. Esta última tem ainda um substrato duro, também com grão fino mas neste caso próximo da superfície da ferramenta (Sandvik Coromant, 2012).

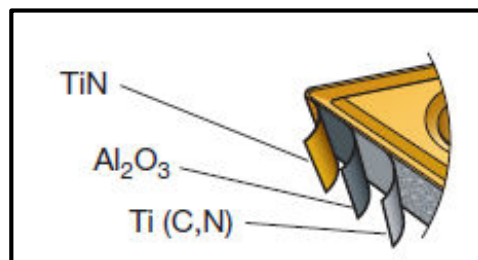


Figura 3.4 - Camadas do revestimento das ferramentas (Sandvik Coromant, 2012)

Para diferenciar as ferramentas utilizou-se o tipo de corte (corte de acabamento, maquinagem média ou desbaste) em que se podem inserir os seus graus (GC4205 e GC4215) em função da resistência ao desgaste e/ou tenacidade, algo que está esposto na Figura 3.5.

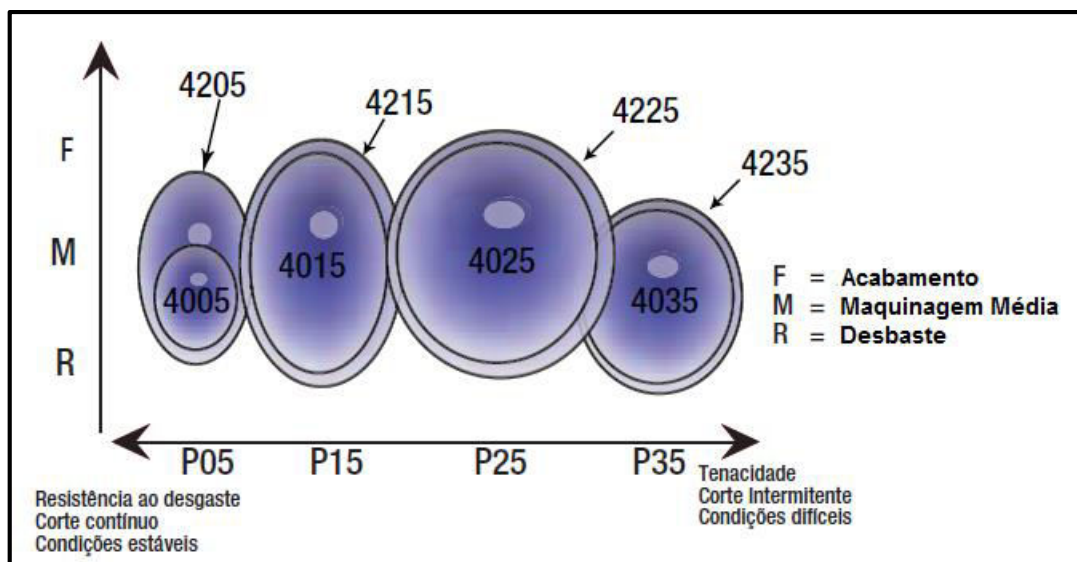


Figura 3.5 – Posicionamento dos vários graus relativamente ao tipo de corte, em função da resistência ao desgaste e/ou tenacidade (Giovanetti, 2008)

3.4 MÁQUINA-FERRAMENTA

Uma das exigências que constam da parte experimental deste trabalho, tem a ver com a precisão da maquinagem. Deste modo seria sempre necessário uma máquina-ferramenta não só com alta precisão, mas também com elevada potência e rigidez.

Para a execução dos ensaios estipulados para este trabalho, utilizou-se o Torno CNC Kingsbury MHP 50, com rotação máxima de 4500 rpm e potência de 18 kW (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Torno CNC Kingsbury MHP 50 onde foram efetuados os ensaios práticos

Entre os componentes do torno utilizado para os ensaios práticos, estão incluídos uma bucha de aperto hidráulico que pode fixar peças até 200mm de diâmetro (Figura 3.7), uma torreta que pode armazenar até 12 ferramentas, um contraponto com 70 mm de diâmetro também ativado por acionamento hidráulico e um controlador FANUC.



Figura 3.7 – Bucha do torno CNC Kingsbury MHP 50

Segue-se um quadro mais abrangente referente às características do torno, na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características do torno CNC Kingsbury MHP 50, utilizado no estudo do aço AISI P20

Contraponto	
Diâmetro	72 mm
Acionamento	Hidráulico
Bucha	
Distância max. efect. entre bucha e 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 (internas e externas)	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

A definição dos parâmetros de corte constituem uma parte muito importante deste trabalho a fim de obter boa qualidade superficial nas peças a maquinar, bem como na sua forma e dimensão.

Neste caso, tem-se duas gamas de valores para os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) para os dois tipos de ensaios a realizar.

Para efetuar os ensaios de corte curtos no aço AISI P20 utilizaram-se os parâmetros na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados para ensaios de corte curtos

Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de Corte (mm)
150	0.05	1
	0.10	
	0.20	
	0.40	
300	0.05	1
	0.10	
	0.20	
	0.40	
450	0.05	1
	0.10	
	0.20	
	0.40	

Os ensaios de corte longo foram feitos com avanço de 0.2 mm/rot e profundidade de 2mm, para velocidades de 150 e 300 m/min. A título de curiosidade efetuaram-se ensaios com avanço substancialmente mais reduzido, neste caso de 0.05 mm/rot juntamente com 1 mm de profundidade. Estes ensaios serviriam essencialmente para ter uma ideia do desgaste das ferramentas de corte com avanços mais reduzidos.

3.5.1 Estratégia de corte

A estratégia de corte adotada para os dois tipos de ensaios foi semelhante, variando apenas a distância do curso da ferramenta.

Antes de começar a maquinagem dos provetes, dispunha-se de provetes com 50.8mm de diâmetro, 203mm de comprimento com um sangramento de 3mm no centro, o que daria duas pistas longas de 100mm disponíveis para os testes. O aperto na máquina foi feito de modo a ser possível maquinar meio provete com uma distância de segurança de cerca de 20mm.

Sendo a profundidade de corte constante ao longo da realização de todos os testes, optou-se por efetuar, nos de corte curto, 4 pistas para cada velocidade de corte, correspondendo cada pista a um avanço. Neste tipo de corte definiu-se que a ferramenta iria perfazer um curso de 20mm em cada pista.

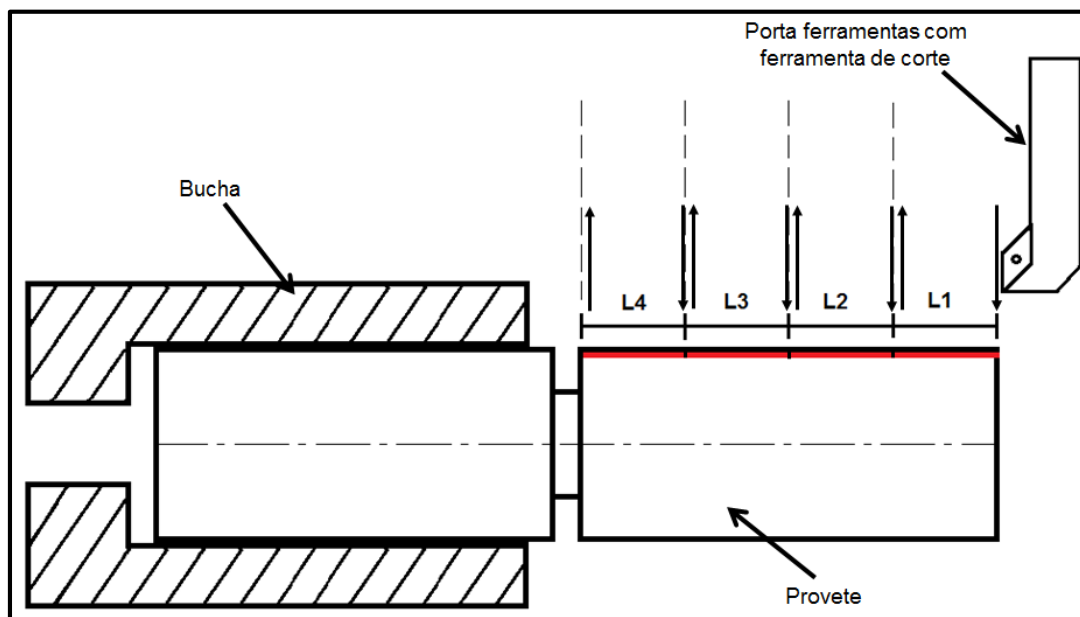


Figura 3.8 – Ilustração do esquema de corte nos ensaios de corte curtos

Seguindo apenas uma velocidade de corte para os 4 avanços, e com profundidade constante (1mm), a ferramenta avança sobre a peça e faz o corte na pista L1, visível na Figura 3.8, de 20mm de comprimento, com avanço de 0.05 mm/rot. Depois de concluída a primeira pista a ferramenta afasta-se da peça, num momento em que o avanço é alterado para 0.10 mm/rot, para dar seguimento à maquinagem da próxima pista, neste caso a L2. Entre a maquinagem de duas pistas, pausou-se o ciclo para ser possível recolher a apara proveniente de cada conjunto de parâmetros. Este procedimento é repetido para mais duas

pistas até a peça ficar maquinada segundo todos os avanços estabelecidos (0.05, 0.10, 0.20 e 0.40 mm/rot).

Depois de efetuadas as pistas para cada velocidade de corte, registaram-se os valores de rugosidade para cada uma delas.

Igual método foi usado para concluir todas as 12 combinações entre velocidades de corte (150, 300 e 450 m/min) e avanços. Dado que foi utilizado lubrificante para os ensaios com velocidade de corte de 300 m/min, tem-se um total de 16 pistas, sendo necessários 2 provetes de aço AISI P20 (uma metade para cada conjunto de 4 pistas).

Por uma questão de segurança no que diz respeito aos limites do torno em termos de rotações por minuto, começou-se pela maior velocidade a fim de aproveitar o maior diâmetro possível do provete. Assim permaneceu-se num campo de rotações por minuto aceitável para o torno, não criando esta vibração que pusesse em causa o estudo a ser feito.

Para os testes de corte longos o procedimento foi idêntico, aumentando apenas o curso efetuado em cada pista para 100mm, maquinando assim a totalidade da metade do provete disponível.

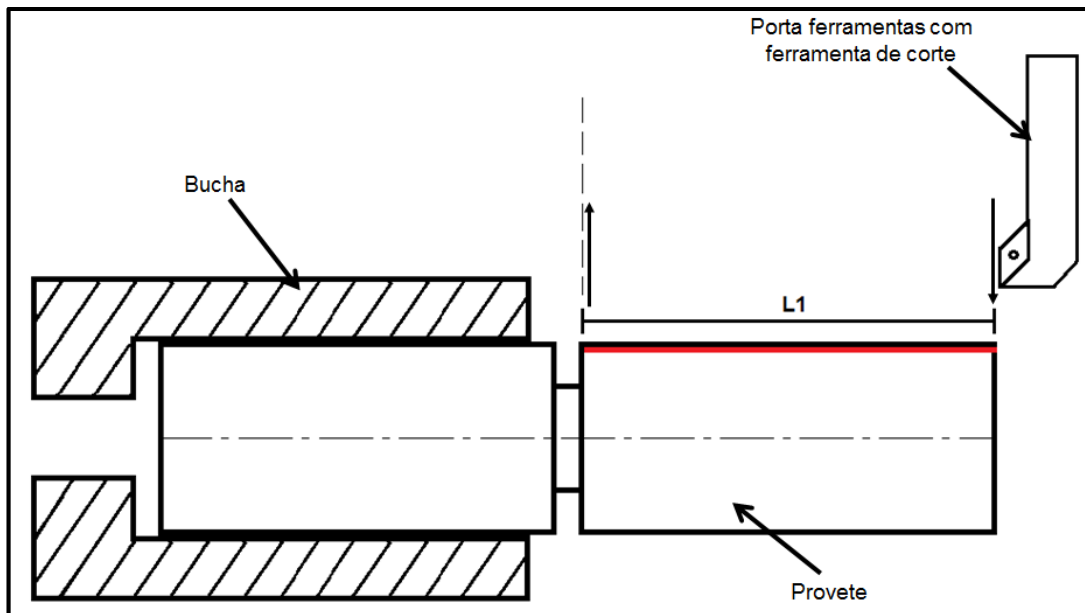


Figura 3.9 - Ilustração do esquema de corte nos ensaios de corte longos

Nos testes de corte longos foram apenas utilizadas duas velocidades diferentes (150 e 300 m/min), com avanço e profundidade constantes, de 0.2 mm/rot e 2 mm respetivamente. Também foram feitos testes com 0.05 mm/rot e 1 mm de profundidade

para velocidade de 150 m/min. Mais uma vez começou-se pela velocidade maior para aproveitar o máximo de diâmetro possível dos provetes.

É importante realçar que, com a finalidade de o trabalho ter mais segurança e precisão, foi utilizado o contraponto em todos os ensaios, algo demonstrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 - Demonstração de um ensaio de corte longo

À semelhança dos ensaios de corte curtos a ferramenta avança sobre a peça, desta vez para perfazer uma pista de 100 mm com o avanço e profundidade referidos. Depois da pista estar concluída recolheu-se a apara e observou-se a ferramenta ao microscópio. Esta metodologia foi repetida até ser verificável um critério de paragem ($V_B=0.3$ mm). Ao ser possível visualizar claramente este critério de paragem, alterou-se o valor da velocidade de corte e repetiu-se o mesmo processo até se verificar novamente um V_B de 0.3 mm.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE

3.6.1 Medição da rugosidade

A caracterização da maquinabilidade de um material tem como critério importante o acabamento superficial obtido. Como tal, a rugosimetria é a técnica mais utilizada para se caracterizar a superfície do material em estudo.

Para a caracterização da superfície foi utilizado o rugosímetro de agulha de diamante Hommel Tester T1000E na Figura 3.11. Este rugosímetro tem uma resolução

máxima de $0.01\mu\text{m}$, um campo de medição de cerca de $80\mu\text{m}$, um cut-off (LC) de 0.25 e 0.8, e segundo **DIN 4772** tem precisão de categoria 1.

Os resultados podem ser consultados tanto num ecrã incorporado no rugosímetro como através de um software associado, de nome Turbo Datawin, como mostra o esquema na Figura 3.12.

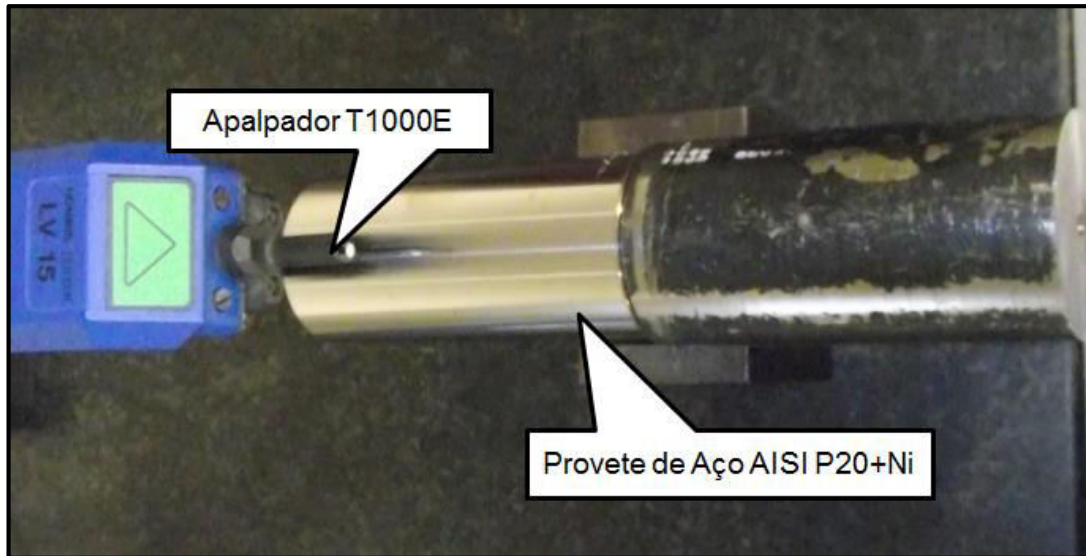


Figura 3.11 – Posição do provete nas medições da rugosidade

Os parâmetros de amplitude selecionados para esta parte experimental do trabalho foram a rugosidade média aritmética (R_a) e a amplitude máxima do perfil da rugosidade (R_t). O comprimento de base (cut-off) utilizado foi de 0.8 mm e o comprimento de palpagem (L_t) foi de 4.8 mm.

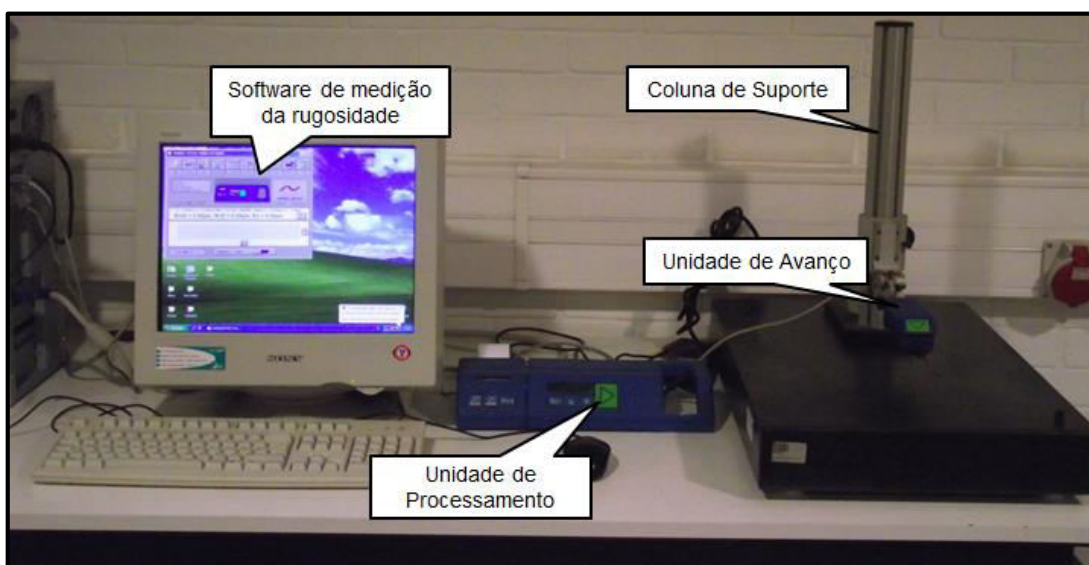


Figura 3.12 – Equipamento utilizado na medição da rugosidade

De acordo com o esquema representado na Figura 3.13, a medição da rugosidade foi feita em 3 pontos distintos da peça, separados por 120° . Após as 3 leituras dos valores de R_a e R_t , fez-se uma média para cada caso.

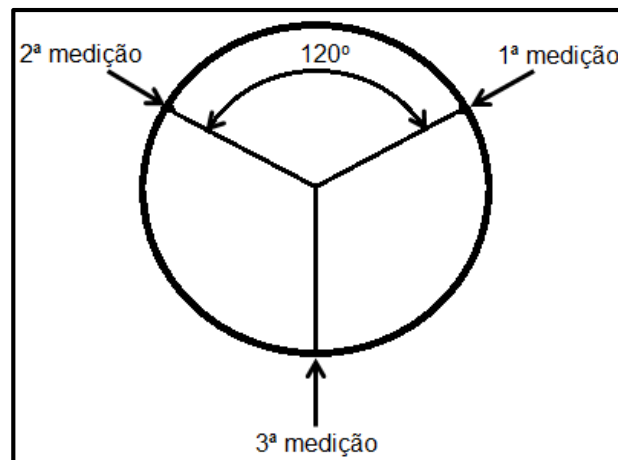


Figura 3.13 – Esquema de medição da rugosidade. Face frontal do provete cilíndrico.

3.6.2 Medição do desgaste da ferramenta

O desgaste na face de saída da ferramenta é a medida de desgaste mais usada, por ser o mais fácil de medir. Este desgaste é quantificado sobretudo por três parâmetros: V_B , $V_{Bmáx.}$ e V_C segundo a norma **ISO 3685:1993**. O primeiro parâmetro corresponde ao desgaste médio e o segundo ao máximo, ambos na zona de desgaste linear da marca de desgaste verificada na face de saída como se pode observar na Figura 3.14 O parâmetro V_C corresponde ao desgaste junto da ponta da ferramenta na face de saída.

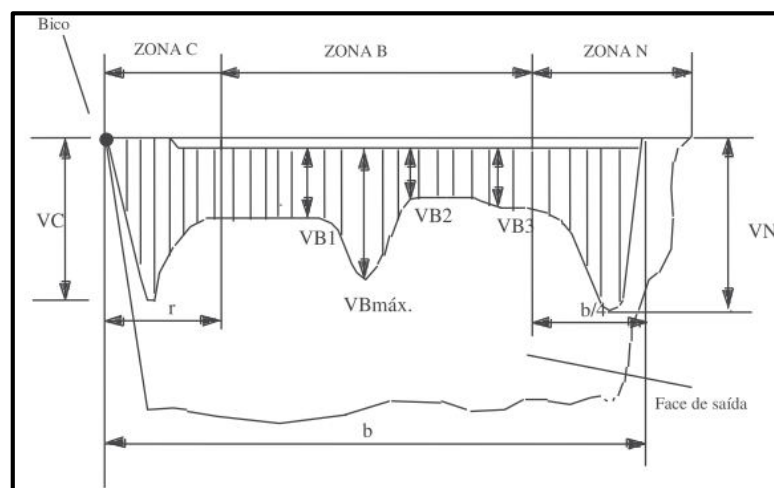


Figura 3.14 – Zonas de desgaste da ferramenta de corte

A observação de desgaste foi realizada no final de cada ensaio de corte longo. Desta forma, foi possível verificar a evolução do desgaste da ferramenta em função do

tempo de vida da mesma, bem como o próprio tempo de vida até se verificar o $V_{Bmáx}$ estipulado pela norma **ISO 3685:1993**.

Em cada um dos ensaios, os parâmetros (V_C , V_B e $V_{Bmáx}$) foram medidos na face de saída, na face de ataque e no bico da pastilha de corte, através de um microscópio ótico de oficina Mitutoyo TM-510 com ampliação 30X, visível na Figura 3.15 Este microscópio tem uma mesa de observação que permite efetuar movimentos de translação perpendiculares através do acionamento dos respectivos fusos. Em cada um deles, está acoplado um mostrador digital que permite visualizar o deslocamento efetuado pelos mesmos, sendo assim possível colocar no visor a melhor perspectiva possível a fim de observar corretamente os desgastes.

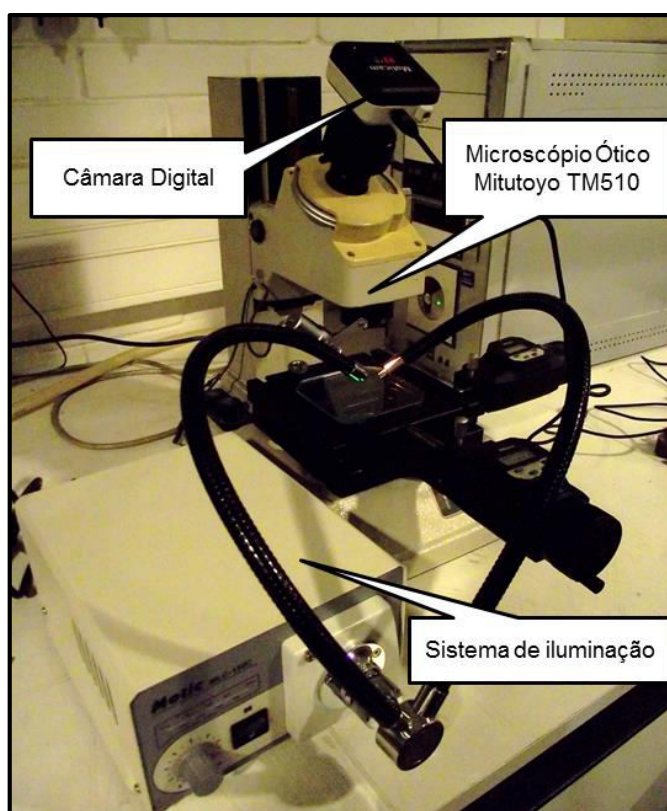


Figura 3.15 – Equipamento utilizado na medição do desgaste das ferramentas de corte

Com a finalidade de medir os parâmetros de desgaste, na observação ao microscópio das ferramentas, recorreu-se ao auxílio de uma câmara digital associada ao software *Motic Images Plus 2.0*, o que permitiu fazer a medição real do desgaste após cada ensaio (Figura 3.15).

Para determinar o tempo de vida das ferramentas foi utilizada a curva de Taylor.

Primeiramente recolheram-se os dados referentes ao desgaste das ferramentas de corte associando-as com o comprimento total maquinado (Anexo C). Fizeram-se as curvas do comprimento maquinado pela ferramenta e o seu desgaste, criando depois curvas de tendência logarítmica. Desde modo tornou-se possível obter um valor de desgaste para qualquer valor no domínio do comprimento maquinado pela ferramenta (Anexo D). A fim de obter X e K, necessários para traçar a curva de Taylor, introduziram-se os valores de comprimento e das velocidades de corte utilizadas nas equações 8 e 9 em anexo. Por fim fez-se uma média de todos os valores de X e K obtidos (Anexo E).

3.6.3 Caracterização da apara

A apara recolhida foi caracterizada segundo a forma e tipo segundo a norma **ISO 3685/1993**. Esta permite fazer a caracterização da apara tendo em conta as condições de corte, a ferramenta de corte e o próprio material em estudo. A norma que foi seguida para efetuar este trabalho experimental, classifica as aparas resultantes do processo de maquinagem em 18 categorias (Figura 3.16).















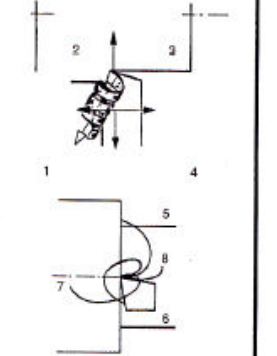




1. Em fita	2. Tubular	3. Espiral	4. Helicoidal em gume	5. Helicoidal Cônica	6. Em arco	7. Em lasca	8. Em agulha
							
1.1. Longa	2.1. Longa	3.1. Plana	4.1. Longa	5.1. Longa	6.1. Ligada		
							
1.2. Curta	2.2. Curta	3.2. Cônica	4.2. Curta	5.2. Curta	6.2. Fragmento		
							
1.3. Enrolada	2.3. Enrolada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

Figura 3.16 - Classificação das aparas

No estudo da maquinabilidade do aço AISI P20, foram obtidas diferentes tipos de apara, algo resultante da variação de parâmetros de maquinagem. A apara foi recolhida para posterior análise e caracterização segundo a norma **ISO 3685:1993**.

3.7 SIMULAÇÃO DE FORÇAS DE CORTE E TEMPERATURA

Para melhor compreensão do processo de corte optou-se por fazer simulações numéricas com as condições de corte utilizadas nos ensaios experimentais. Para tal efeito, foi desenvolvido um modelo 3D com auxílio do software *AdvantEdge™* (Figura 3.17). A modelação do material foi desenvolvida usando o modelo do *POWER LAW*. As propriedades do material foram consideradas segundo Maekawa *et al.* (1996) e Özel and Altan (2000). Para validar a modelação do material, foram simuladas algumas das condições apresentadas por Özel and Altan (2000), considerando um desvio de $\pm 40\%$, valor regularmente utilizado na literatura consultada (Tabela 3.6). Para todas as situações obtiveram-se resultados dentro do desvio validando assim a modelação dos autores em questão. Em todos os casos, foi considerado o valor de 0,5 de atrito respeitando a Lei de Coulomb, comprimento de corte de 4mm e temperatura inicial de 20°C. Para análise dos resultados das forças de corte e temperatura, foi considerada a média dos valores de pico, descartando os iniciais e finais devido à inércia.

Tabela 3.6 - Desvio dos resultados da modelação

Avanço (mm/rot)	Velocidade de Corte (m/min)	Medido (Özel and Altan, 2000)		Simulado		Desvio	
		Força de corte (N)	Força de Avanço (N)	Força de corte (N)	Força de Avanço (N)	Força de corte	Força de avanço
0,1	200	273,0	188,0	193,7	156,1	29%	17%
	300	271,0	175,3	195,0	168,7	28%	4%
0,075	200	219,5	169,8	159,9	135,8	27%	20%
	300	200,5	137,3	155,8	131,2	22%	4%
0,051	200	173,0	153,9	114,7	107,1	34%	30%
	300	163,5	129,7	104,1	93,9	36%	28%
	450	162,5	121,4	107,9	94,4	34%	22%

A geração de malha é realizada automaticamente pelo programa, definindo um tamanho mínimo do elemento (0.03mm) próximo às extremidades da ferramenta e tamanho máximo do elemento (0.3mm) no interior da ferramenta (Figura 3.18). Para a malha do corpo foi definido um tamanho mínimo do elemento de 0,15mm, próxima à região do corte e um tamanho máximo do elemento de 1mm no interior para as extremidades do corpo de prova. A Figura 3.19 exemplifica a criação de malha num corpo de prova.

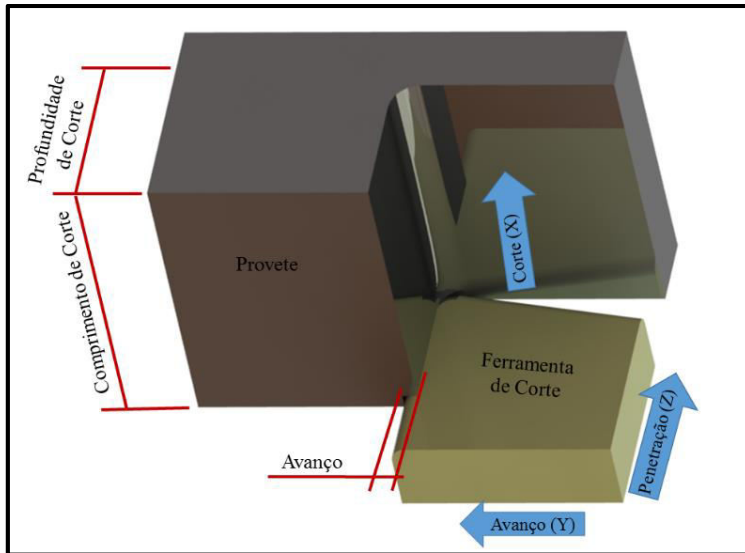


Figura 3.17 – Metodologia da modelação

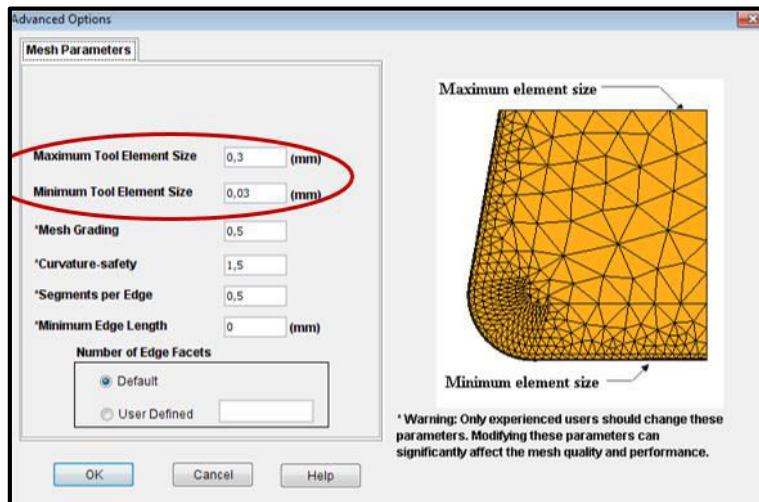


Figura 3.18 – Definição da malha para a ferramenta

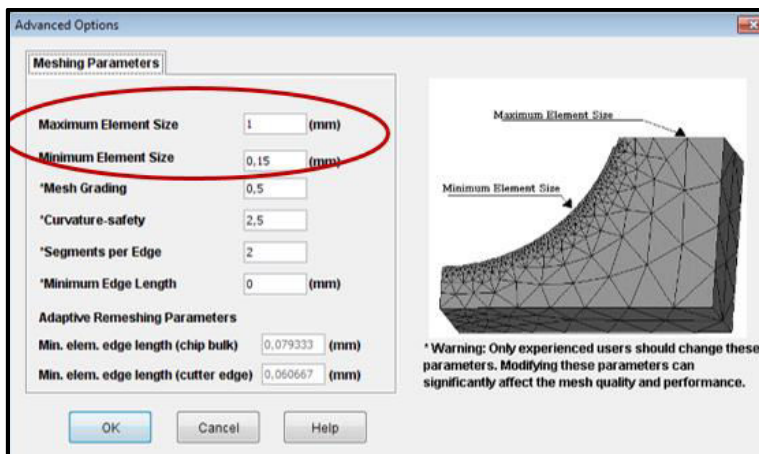


Figura 3.19 – Definição da malha para o corpo a ser maquinado

3.8 SÍNTESE

O organigrama da Figura 3.20 resume de uma forma clara todo o desenvolvimento experimental associado a este trabalho.

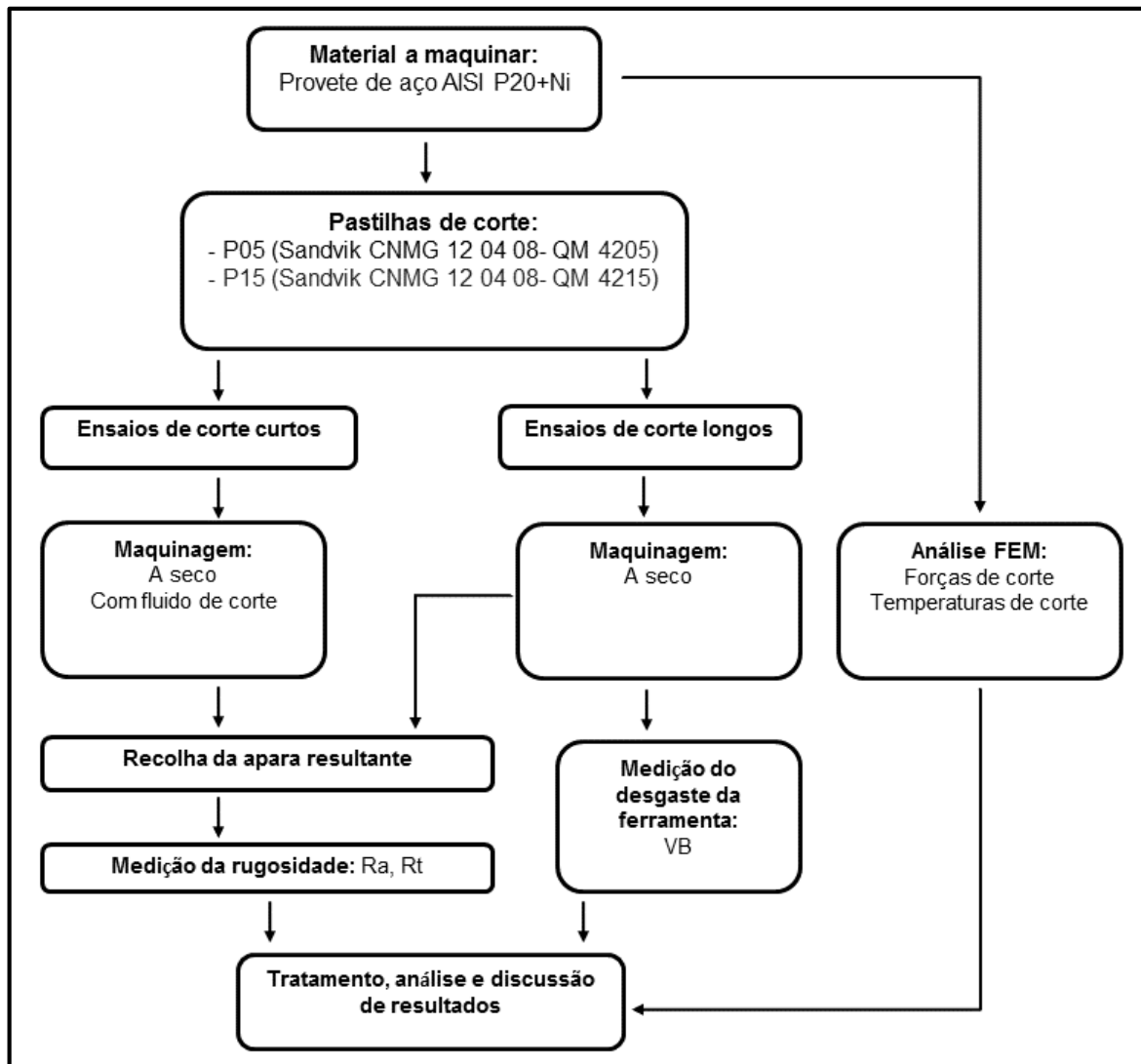


Figura 3.20 – Organigrama do procedimento experimental

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos no procedimento experimental deste trabalho, sendo também aqui analisados e discutidos. Para tal, dividiu-se a análise dos resultados em dois grupos: a análise dos resultados obtidos em ensaios de corte curtos e análise dos resultados obtidos em ensaios de corte longos.

Na análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de corte curtos, apresentam-se as aparas obtidas e gráficos com as rugosidades medidas após cada ensaio, nomeadamente a rugosidade média aritmética (Ra) e a rugosidade máxima (Rt). Estão também presentes neste subcapítulo, os intervalos de tolerância (IT) usadas a fim de classificar a precisão dimensional das superfícies dos provetes depois de maquinados.

A análise dos resultados obtidos em ensaios de corte longos foi idêntica à dos ensaios de corte curtos, no que toca à estrutura da discussão. Apenas se acrescentou a análise do desgaste e da vida das ferramentas utilizadas neste processo bem como resultados das simulações.

4.1 ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO AISI P20 (ENSAIOS DE CORTE CURTOS)

A análise da maquinabilidade nos ensaios de corte curtos consiste na classificação das aparas obtidas em cada situação de maquinagem, a evolução do acabamento superficial dos provetes utilizados nos testes através da rugosidade média aritmética (Ra) e rugosidade máxima (Rt) bem como a determinação da precisão dimensional da superfície maquinada obtida.

Nestes ensaios foram utilizados dois tipos de ferramenta de corte, uma da classe P05 e outra da P15. Em termos de parâmetros de maquinagem, foram utilizadas 3 velocidades de corte, 150, 300 e 450 m/min, com quatro avanços diferentes (0,05; 0,1; 0,2 e 0,4 mm/rot). Para a velocidade de corte de valor intermédio, fizeram-se também ensaios com lubrificante. Em todas as situações de maquinagem a profundidade foi de 1 mm.

4.1.1 Forma de aparas obtidas

Na grande maioria as aparas obtidas são do tipo 4 (helicoidal em gume), variando entre os 3 tipos de apra dentro desta forma, 4.1, 4.2 e 4.3 (longa, curta e enrolada) segundo a norma **ISO 3865/1993**. Também surge o tipo 1 (em fita) esta sempre na forma 1.3 (enrolada).

Da Tabela 4.1 à Tabela 4.4 encontram-se as aparas obtidas para cada conjunto de parâmetros de corte utilizado nos ensaios curtos. Para cada uma apresenta-se também a apara obtida para cada tipo de ferramenta. A uma tabela corresponde uma velocidade de corte, à exceção da última que diz respeito aos ensaios com utilização de fluido de corte, para todos os avanços utilizados.

Tabela 4.1 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 150m/min, para as duas ferramentas de corte



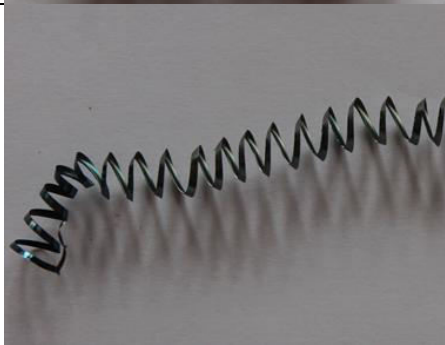

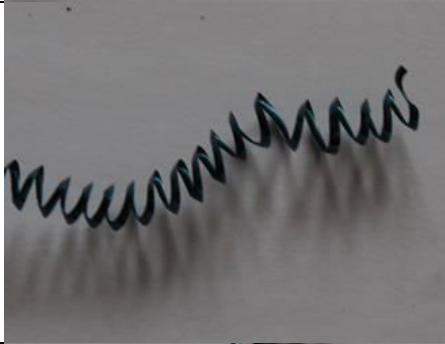

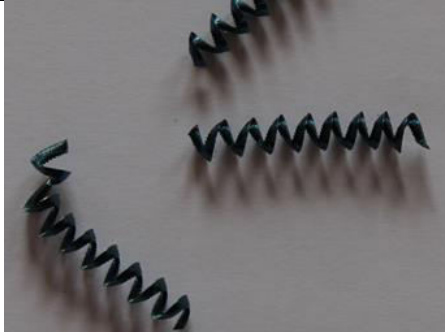

Avanço (mm/rot)	P05	P15
0,05		
0,1		
0,2		
0,4		

Tabela 4.2 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 300m/min, para as duas ferramentas de corte









Avanço (mm/rot)	P05	P15
0,05		
0,1		
0,2		
0,4		

Tabela 4.3 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 450m/min, para as duas ferramentas de corte















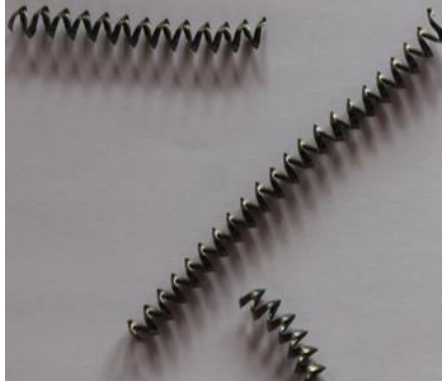

Avanço (mm/rot)	P05	P15
0,05		
0,1		
0,2		
0,4		

Tabela 4.4 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com velocidade de corte de 300m/min e com utilização de lubrificante, para as duas ferramentas de corte

Avanço (mm/rot)	P05	P15
0,05		
0,1		
0,2		
0,4		

É visível que as aparas variam a sua forma em função tanto da velocidade de corte como do avanço, de forma mais clara segundo este último. Também a utilização de fluido de corte induz alguma diferença relativamente às aparas obtidas nos ensaios a seco. Já em relação às ferramentas de corte, não há diferenças significativas, algo expectável dado a geometria das mesmas ser igual.

As aparas obtidas são essencialmente do tipo helicoidal variando a sua forma, pois foram obtidas longas, curtas e enroladas. A exceção ocorreu nos ensaios de avanço mais curto onde todas as aparas resultantes são do tipo fita e com forma enrolada. As classificações referentes às aparas obtidas em todos os testes estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resumo da classificação das formas de apara obtidas para cada situação nos ensaios de corte curtos

a (mm/rot)	v _c =150m/min (seco)		v _c =300m/min (seco)		v _c =450m/min (seco)		v _c =300m/min (com lubrificante)	
	P05	P15	P05	P15	P05	P15	P05	P15
0,05	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
0,1	4.1	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
0,2	4.1	4.1	4.3	4.3	4.1	4.1	4.1	4.1
0,4	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1

4.1.2 Rugosidade da superfície

Analisaram-se os resultados da rugosidade média aritmética (Ra), parâmetro que é o mais utilizado para controlar a qualidade da superfície das peças maquinadas, bem como a rugosidade máxima (Rt).

Os gráficos relativos aos ensaios de corte curtos apenas são representados para os três avanços mais baixos (0,05; 0,1 e 0,2 mm/rot). Tal medida foi adotada devido às rugosidades serem perceptivelmente muito elevadas e conseqüentemente colocarem em causa a integridade do material de leitura, no caso do valor mais alto para o avanço (0,4 mm/rot).

4.1.2.1 Rugosidade da superfície obtida nos ensaios efetuados com a ferramenta P05

Nesta secção serão apresentados os resultados do acabamento da superfície, nomeadamente as rugosidades e o gráfico de intervalo da tolerância (IT), obtidos durante todos os ensaios de cortes de maquinagem do aço AISI P20, com a ferramenta P05.

A Figura 4.1 mostra a evolução da rugosidade média aritmética (R_a) em função dos diferentes avanços utilizados na experiência dos ensaios curtos, para todas as velocidades utilizadas nos ensaios experimentais, tanto a seco como com lubrificante, com a ferramenta P05 e a curva teórica da rugosidade aritmética (R_{ta}), calculada através da equação 3.

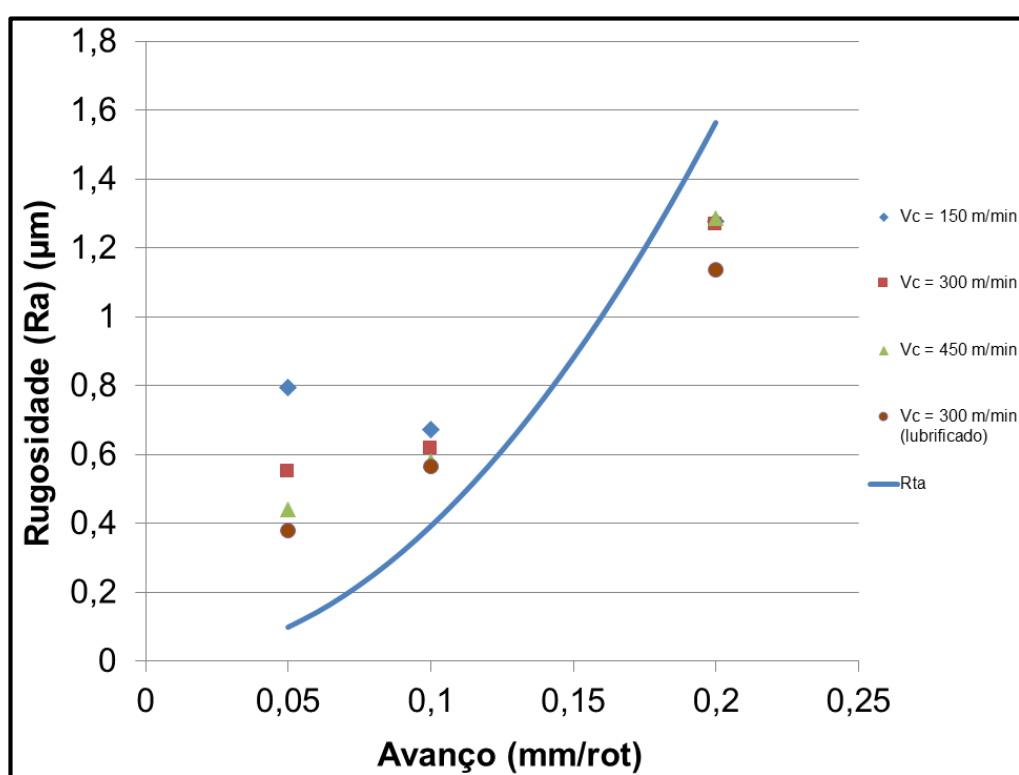


Figura 4.1 - Rugosidade média aritmética (R_a) em função do avanço (ferramenta P05)

Pela observação do gráfico presente na Figura 4.1, é visível que a rugosidade aumenta à medida que o avanço (a) é, também ele, aumentado, algo que era esperado. Outro dado expectável prende-se com o facto de a rugosidade ser mais baixa quando é utilizado fluido de corte, para todos os casos diferentes de velocidade de corte usadas. De referir ainda que os valores teóricos da rugosidade média aritmética são inferiores aos experimentais à exceção dos valores obtidos para o avanço de 0,02mm/rot. Nesta caso o valor teórico é cerca de 0,3 μm maior que o prático.

De acordo com Grzesik (1996), geralmente a rugosidade teórica não condiz com resultados experimentais sob avanços de corte muito baixos. A fonte desta discrepância é justificada principalmente pela deformação plástica na região de corte, recuperação elástica da superfície após a maquinagem, adesão entre as aparas e a ferramenta e as vibrações entre esta e o provete.

A Figura 4.2 mostra a evolução da rugosidade máxima (R_t) em função dos diferentes avanços utilizados na experiência dos ensaios curtos, para todas as velocidades utilizadas nos ensaios experimentais, tanto a seco como com lubrificante, com a ferramenta P05 e a curva teórica da rugosidade máxima (R_{tt}), calculada através da equação 2.

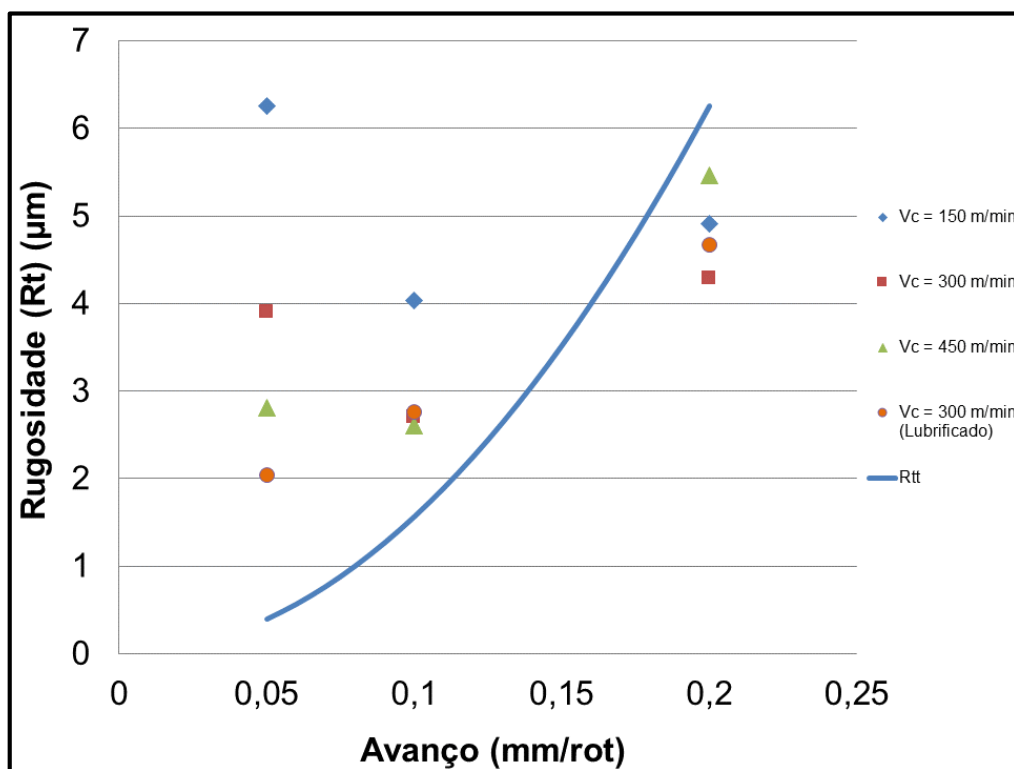


Figura 4.2 - Rugosidade máxima (R_t) em função do avanço (ferramenta P05)

Através da observação do gráfico na Figura 4.2, verifica-se que quanto maior o avanço, menos a rugosidade varia entre os valores da velocidade de corte utilizados. Se se considerar os valores das rugosidades máximas obtidas para cada avanço (a), é verificável que esta diminui com o aumento da velocidade. Para o avanço mais baixo (0,05 mm/rot) a rugosidade máxima varia sensivelmente entre 2 e 6 μm , ao passo que no avanço mais alto em que foram feitas leituras (0,2 mm/rot), varia aproximadamente entre 4,3 e 5,5 μm . Em relação à rugosidade máxima teórica esta tem valores inferiores em comparação com as rugosidades no primeiro e segundo avanços e superior em relação ao avanço mais alto.

Na Figura 4.3 podemos observar a evolução do IT em função do avanço para as velocidades de corte utilizadas. É notório que há um melhor IT para a velocidade mais elevada, 450m/min. Do mesmo modo também é visível que quanto mais elevado é o avanço, menos a velocidade tem influência no IT. Ainda se pode dizer de uma maneira geral, que o próprio avanço também piora o IT.

Os valores de IT obtidos estão situados entre 11 μ m (IT5) e 25 μ m (IT 7) para os avanços de 0.05 e de 0.1mm/rot e entre 25 μ m e 39 μ m (IT8) para 0.2mm/rot.

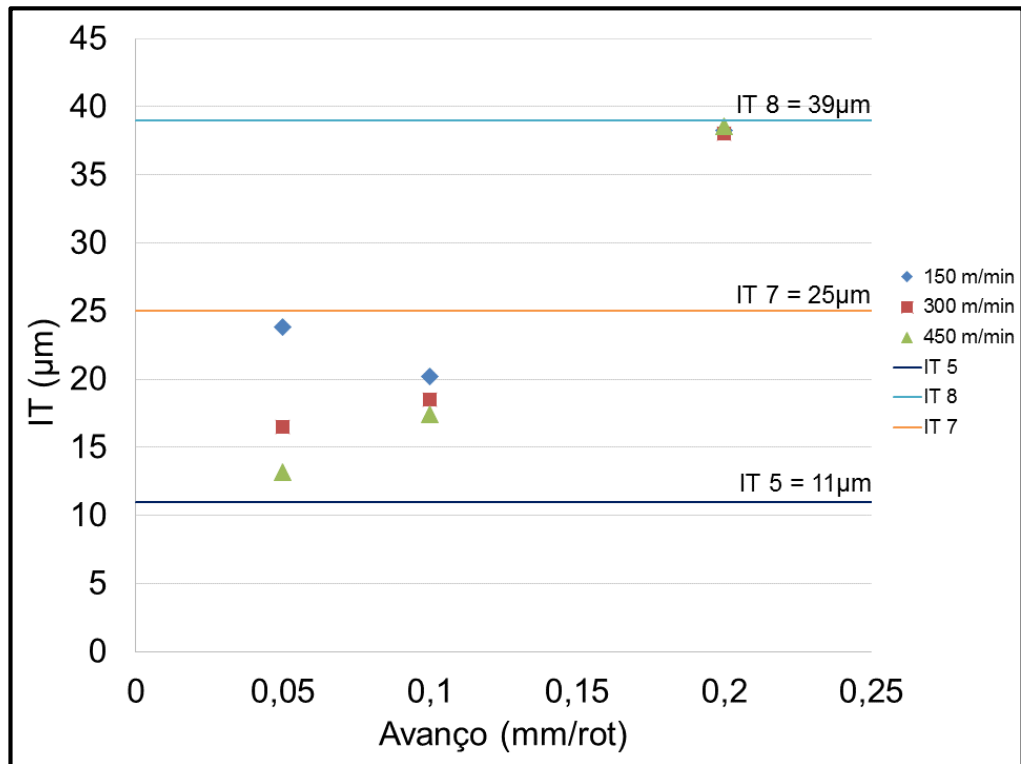


Figura 4.3 – Evolução do IT em função do avanço para as velocidades de corte testadas (ferramenta P05)

Encontra-se uma situação idêntica quando comparados os resultados dos testes a seco com os que tiveram uso de fluido de corte (Figura 4.4), isto é, o IT a aumentar consoante o avanço é maior. Para todos os casos, tem-se um melhor IT com uso de fluido de corte, com diferenças significativas. No entanto, todos os valores estão compreendidos entre 11 e 25 μ m (entre IT5 e IT7), excetuando o caso do avanço mais elevado que regista um IT entre 25 e 39 μ m (entre IT7 e IT8).

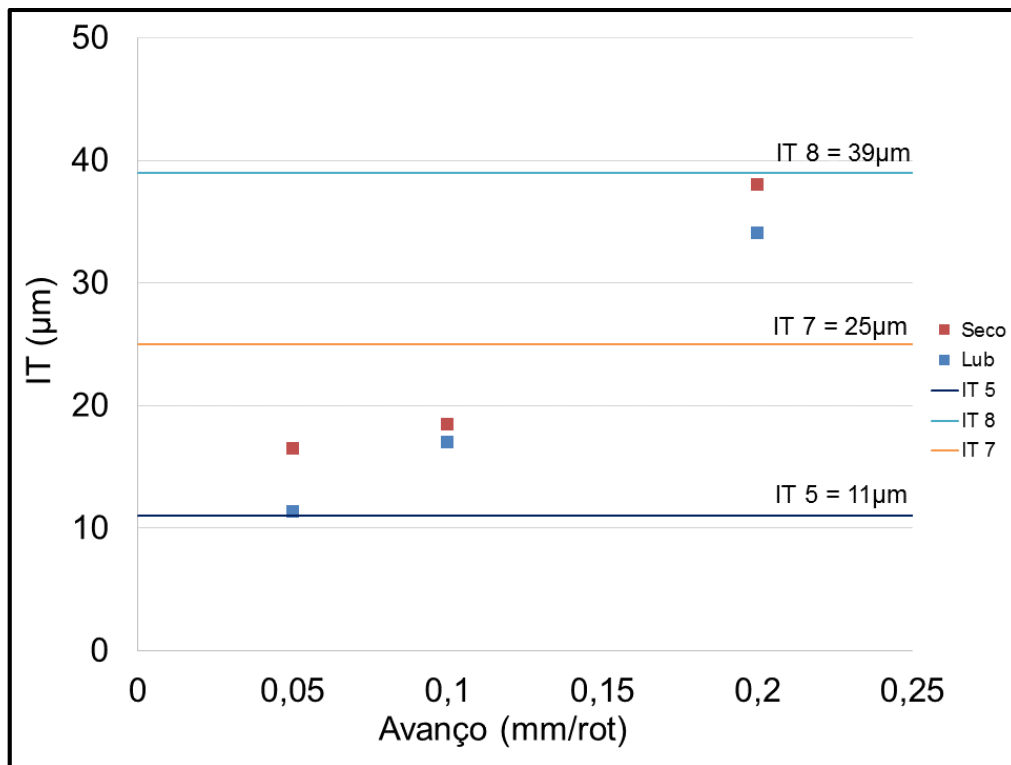


Figura 4.4 – Evolução do IT em função do avanço para ensaios a seco e com uso de lubrificante (ferramenta P05)

4.1.2.2 Rugosidade da superfície obtida nos ensaios efetuados com a ferramenta P15

Na Figura 4.5 pode ver-se o gráfico com a evolução da rugosidade média aritmética (R_a) em função dos diferentes avanços utilizados nos ensaios curtos, para todas as velocidades utilizadas, tanto a seco como com lubrificante, com a ferramenta P15 e a curva teórica da rugosidade média aritmética (R_{ta}), calculada através da equação 3.

Através da análise da Figura 4.5 conclui-se que o avanço(a) tem influência no aumento da rugosidade (R_a). No entanto entre 0,05 e 0,1 (mm/rot) não há diferenças significativas a registar na variação da rugosidade (R_a). De referir também que a variação da velocidade de corte (v_c) praticamente não tem influência nos valores da rugosidade média aritmética (R_a). A curva da rugosidade teórica (R_{ta}) tem valores inferiores aos práticos para $a=0.05$, idênticos para 0.1 mm/rot, ultrapassando depois os valores obtidos para 0.2 mm/rot.

A Figura 4.6 tem presente a variação da rugosidade máxima (R_t) em função dos diferentes avanços, para todas as velocidades utilizadas nos ensaios de corte curtos, quer a seco quer com lubrificante, com a ferramenta P15 bem como a curva teórica da rugosidade máxima (R_{tt}), calculada através da equação 2.

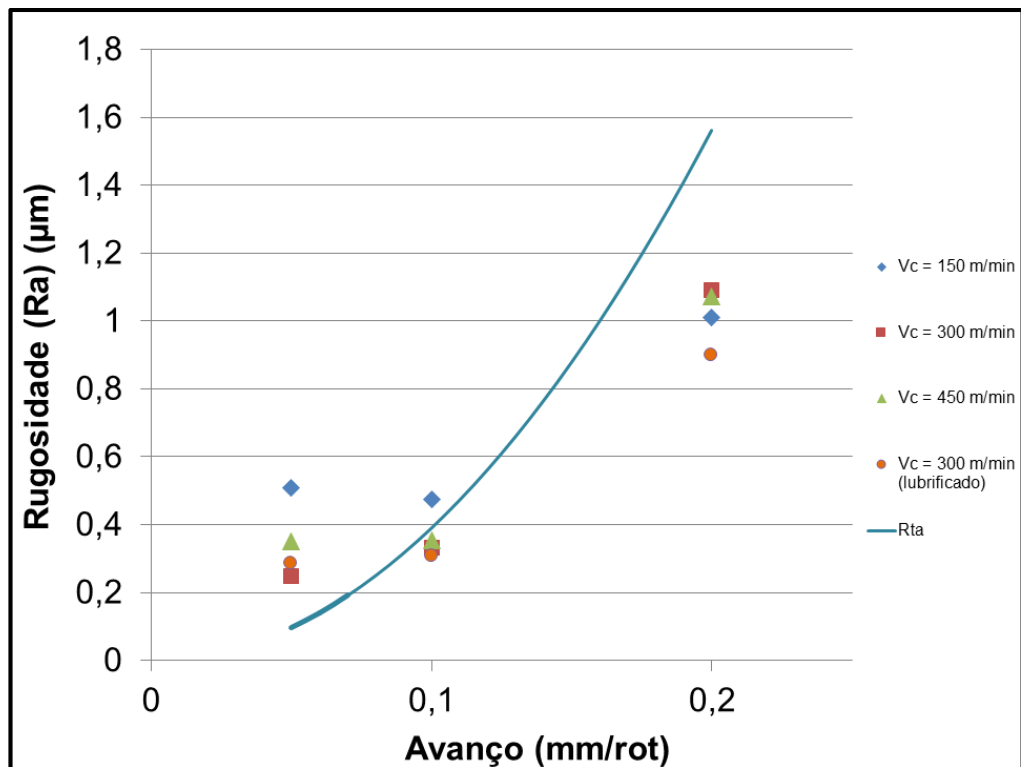


Figura 4.5 – Rugosidade média aritmética (Ra) em função do avanço (ferramenta P15)

Com a observação do gráfico presente na Figura 4.6 constata-se que o avanço (a) causa variação na rugosidade máxima (Rt) na medida em que torna os valores de rugosidade correspondentes às várias velocidades de corte mais próximos entre si, em caso de incremento. Para 0.2 mm/rot, os valores de rugosidade estão muito aproximados, entre 4 e 5 μm , algo muito diferente do que se verifica para 0,05 mm/rot, em que se tem valores abaixo de 2 e acima de 5 μm . Relativamente a valores teóricos, estes passam a ser superiores aos práticos a partir de avanços de 0.2 mm/rot.

Na Figura 4.7 está o gráfico com a evolução do IT em função do avanço relativamente à ferramenta P15. Todos os valores de IT para os avanços mais baixos (0.05 e 0.1mm/rot) encontram-se entre 7 e 16 μm , ou seja, entre o IT4 e o IT6. Ao se aumentar o avanço, o IT passa a estar entre 25 e 39 μm , valores correspondentes ao IT7 e IT8 respetivamente.

Através da Figura 4.8 mais uma vez obtêm-se valores de IT a aumentarem em função do avanço, ou seja é verificada uma situação idêntica à da ferramenta P05. Contudo, se se passar para uma comparação dos resultados provenientes de testes com uso de lubrificante e os resultados obtidos nos testes a seco (ambos efetuados com 300m/min de velocidade de corte), não existem diferenças significativas para os dois avanços mais baixos. Aqui é verificado um IT entre 7 e 11 μm (IT4 e IT5).

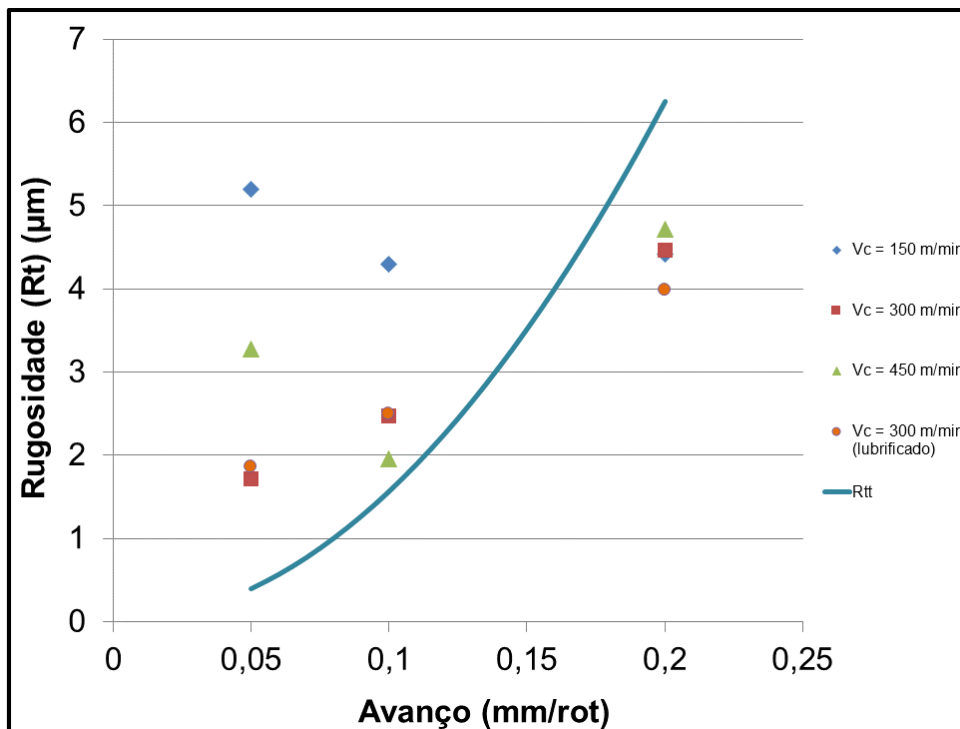


Figura 4.6 – Rugosidade máxima (R_t) em função do avanço (ferramenta P15)

Apenas para o avanço mais elevado, surge um IT ligeiramente melhor quando o teste é feito com uso de lubrificante, tendo este último registado um valor de IT cerca de $5\mu\text{m}$ mais baixo. Os dois valores estão entre o IT7 e o IT8.

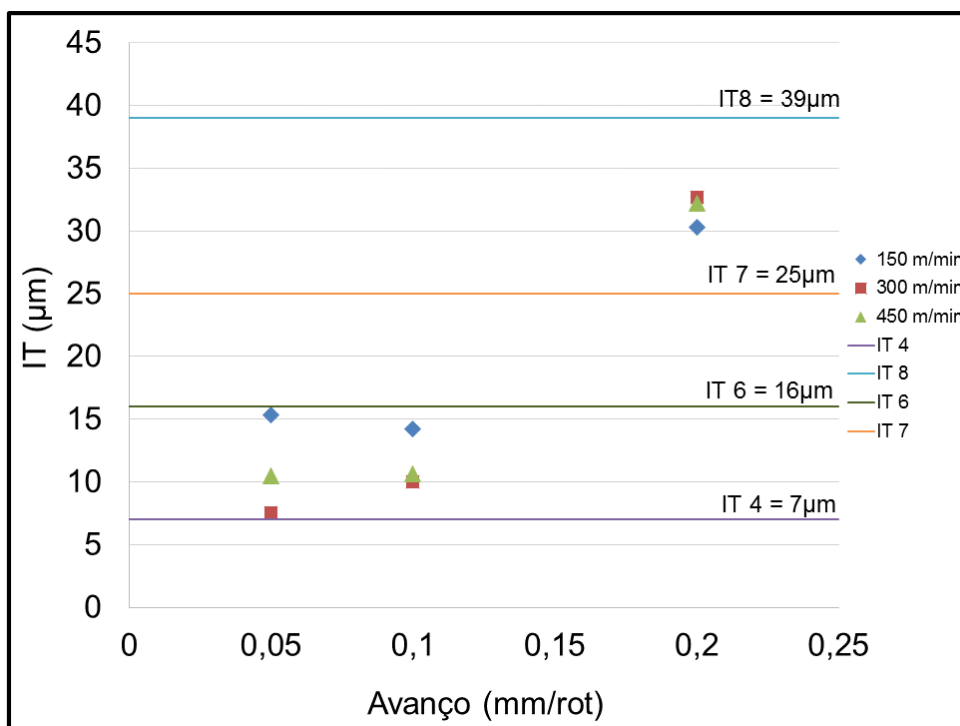


Figura 4.7 - Evolução do IT em função do avanço para as velocidades de corte testadas (ferramenta P15)

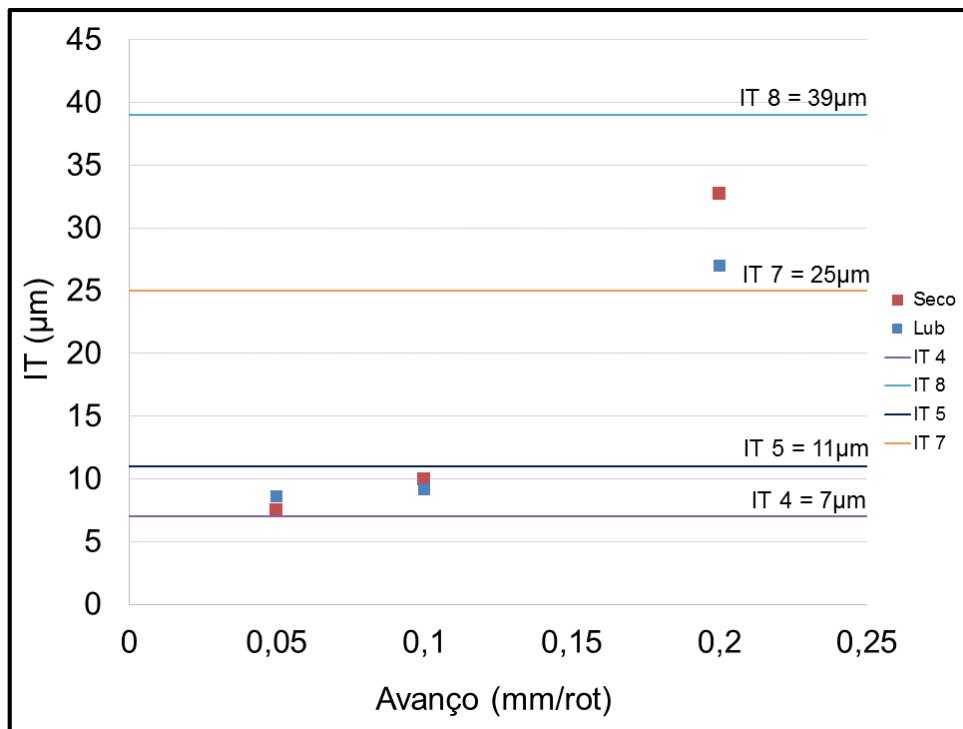


Figura 4.8 - Evolução do IT em função do avanço para ensaios a seco e com uso de lubrificante (ferramenta P15)

4.2 ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DO AÇO AISI P20 (ENSAIOS DE CORTE LONGOS)

A análise da maquinabilidade do aço AISI P20 foi baseada principalmente na evolução do acabamento superficial das peças (R_a e R_t), na classificação das aparas obtidas e no desgaste das ferramentas utilizadas no procedimento experimental.

Nos ensaios de corte efetuados nesta parte do procedimento experimental, utilizaram-se dois tipos de substrato em ferramentas de corte de geometria igual. Usaram-se ainda duas velocidades de corte (150 e 300m/min) e dois avanços e profundidades no caso da velocidade mais baixa (0,05 e 0,2mm/rot para avanços, 1 e 2mm para profundidades), permanecendo o avanço e profundidade constantes para os ensaios efetuados com $v_c=300$ m/min (0,2mm/rot e 2mm respetivamente).

4.2.1 Rugosidade da Superfície

Na Figura 4.9 encontram-se o gráfico que mostra a variação da rugosidade média aritmética (R_a) em função do desgaste das pastilhas utilizadas para os ensaios de corte longos. O gráfico refere-se aos testes efetuados com velocidade de corte de 150m/min, avanço de 0,05mm/rot e 1mm de profundidade.

A rugosidade varia entre valores de 0,5 e 1,5 μm no que diz respeito à pastilha P05, à semelhança da P15 (Ra) apresentando esta um valor máximo ligeiramente superior. No entanto, de um modo geral a rugosidade (Ra) tem valores mais elevados no caso da ferramenta P15, verificando-se também aqui um crescimento mais acentuado.

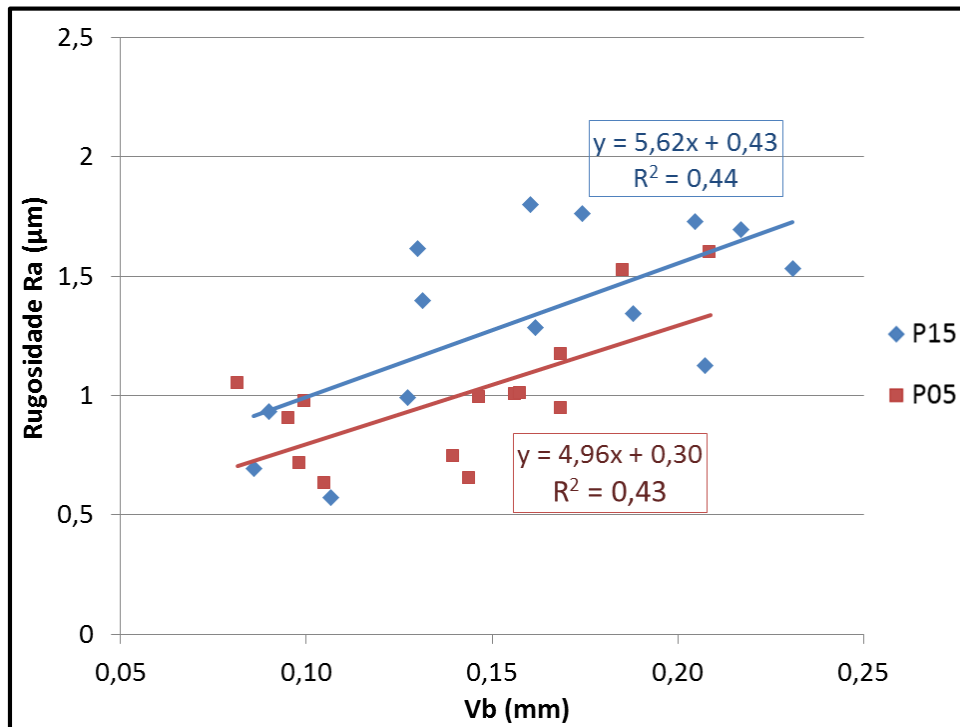


Figura 4.9 - Rugosidade média aritmética (Ra) em função do desgaste das ferramentas de corte com os parâmetros: $v_c=150\text{m/min}$; $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$

É visível que a rugosidade tende a baixar um pouco no início de vida de ambas as pastilhas, aumentando depois gradualmente à medida que o desgaste aparece. Este facto pode dever-se à acomodação da pastilha à superfície do provete, período do qual poderão resultar valores de rugosidade maiores que os registados a meio do tempo de vida da pastilha. Para ambos os casos tem-se correlações moderadas ($R>0,5$).

De facto e de acordo com Poulachon et al. (2001) e com Arsecularatne et al (2006), a tendência de um rápido crescimento do desgaste no início dos ensaios ocorre devido ao facto da aresta se acomodar em relação ao processo, acontecendo micro lascamentos e proporcionando um desgaste mais acentuado no começo do processo de corte. Esses mesmos lascamentos podem incutir valores maiores de Ra.

Ao nível da rugosidade máxima (Rt), verifica-se que para ambas as ferramentas de corte o intervalo de variação dos valores é idêntico, situado entre 5 e 13 μm sensivelmente. Os valores são ligeiramente superiores para a ferramenta P15, contudo há um crescimento

mais acentuado para a P05 como se pode ver na Figura 4.10. Para ambos os casos tem-se correlações moderadas ($R > 0,5$).

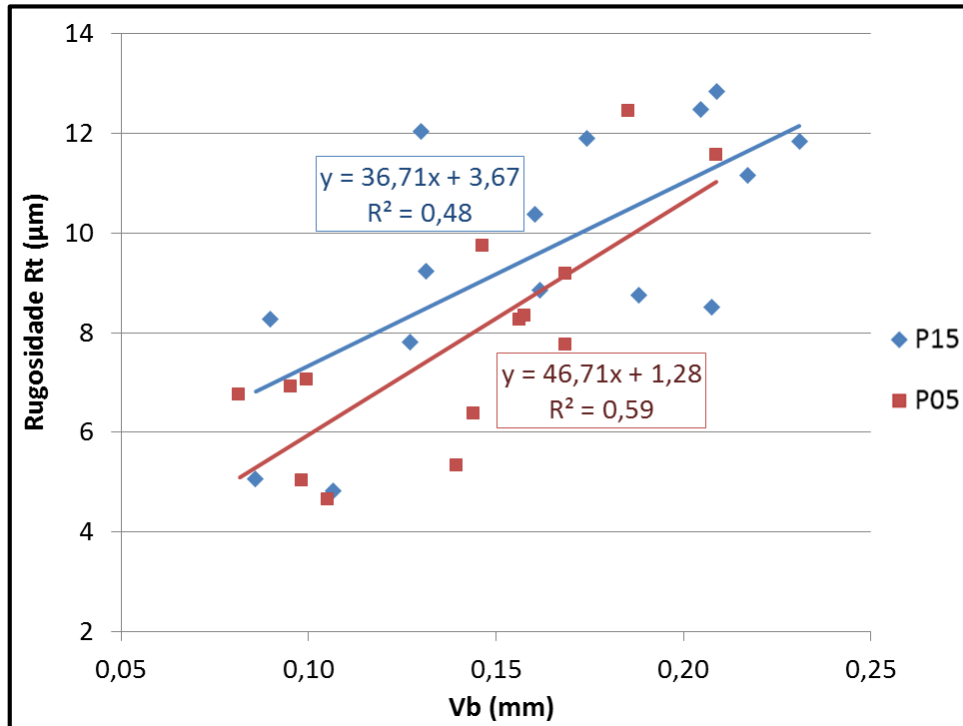


Figura 4.10 - Variação da rugosidade máxima (R_t) em função do desgaste das ferramentas de corte com os parâmetros: $v_c=150m/min$; $a=0,05mm/rot$ e $p=1mm$

4.2.2 Desgaste e vida da ferramenta de corte

No que diz respeito à relação do desgaste com o tempo de corte despendido pelas ferramentas utilizadas para a experiência dos ensaios de corte longos e começando pelos testes de velocidade mais elevada ($300m/min$), é perceptível que a ferramenta P15 desgasta-se mais depressa ao longo do tempo de corte (Figura 4.11). Para qualquer fase de medição, a ferramenta P05 apresenta valores de desgaste inferiores, pelo que perfaz o valor estipulado pela norma **ISO 3865:1993** com mais de 2 minutos de tempo de corte. A ferramenta P15 atinge este valor com menos meio minuto.

Ao se relacionar o desgaste das pastilhas (V_B) com o tempo de corte, obtém-se resultados bem diferentes na situação em que se usou o avanço e profundidade mais elevados para $150m/min$ ($a=0,2mm/rot$ e $p=2mm$). No caso da ferramenta P15, verifica-se uma subida do V_B de forma muito mais lenta como se constata ao verificar o gráfico na Figura 4.12, ao passo de serem necessários mais de 10 minutos de tempo de corte para o desgaste ser superior a $0,2mm$. A ferramenta P05, por outro lado, atinge desgaste já perto do estabelecido como limite pela norma **ISO 3865:1993** em apenas 5 minutos. De facto, com esse tempo, a pastilha P15 apenas registava um V_B de $0,15mm$.

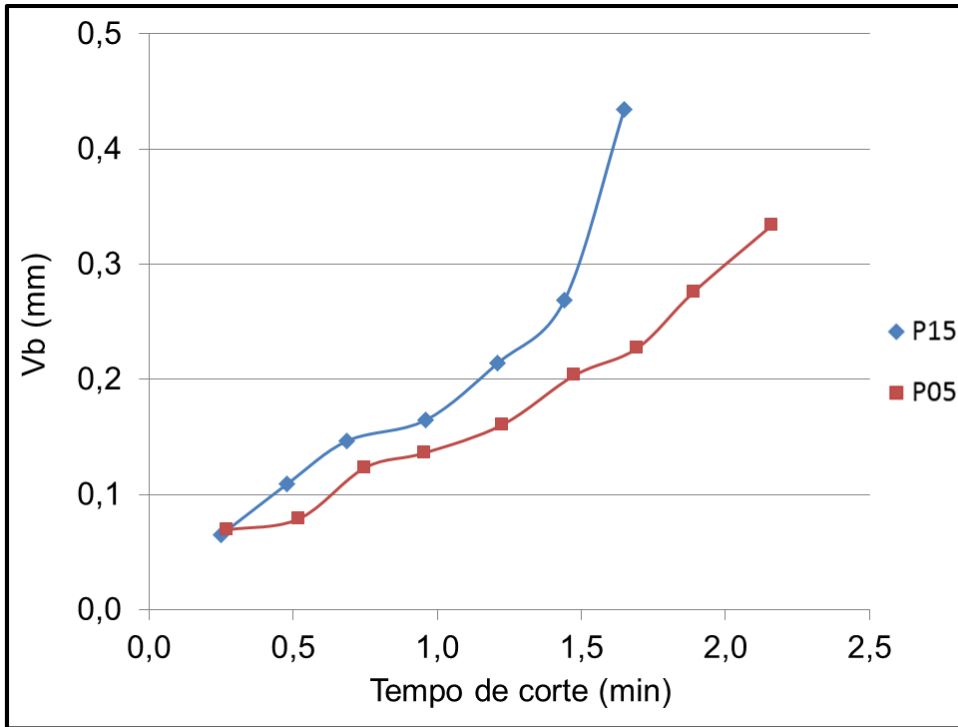


Figura 4.11 - Desgaste das ferramentas de corte em função do tempo para os parâmetros: $v_c=300\text{m/min}$; $a=0,2\text{mm/rot}$ e $p=2\text{mm}$

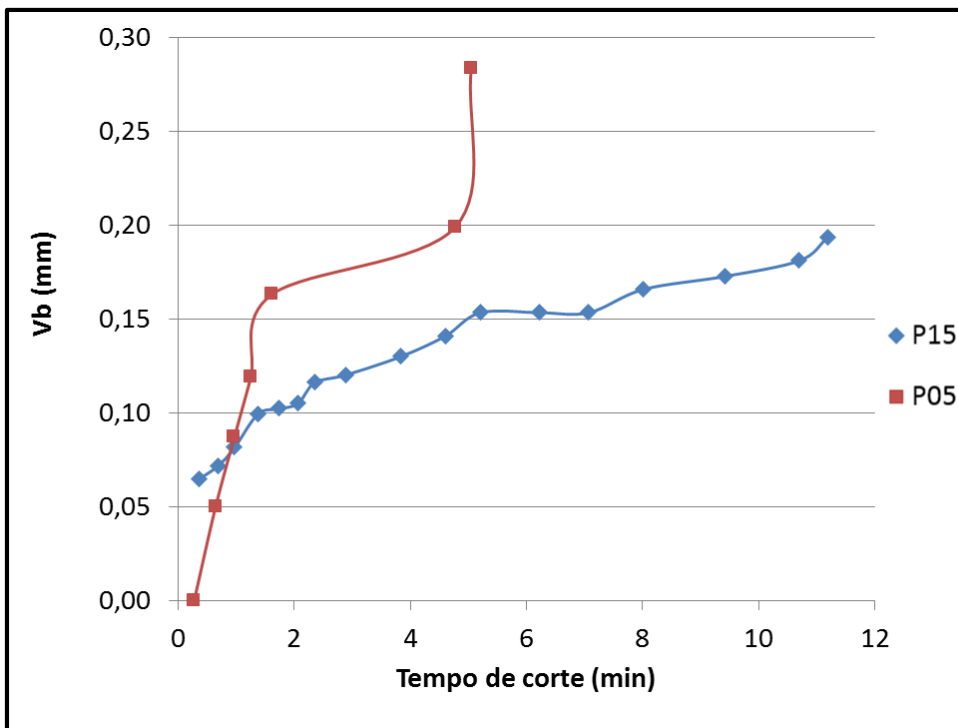


Figura 4.12 - Desgaste das ferramentas de corte em função do tempo para os parâmetros: $v_c=150\text{m/min}$; $a=0,2\text{mm/rot}$ e $p=2\text{mm}$

Para valores de avanço e profundidades mais baixos (0,05mm/rot e 1mm respectivamente) as curvas são idênticas para ambas (Figura 4.13). Ao se estabelecer o limite de desgaste em 0,2mm, verifica-se que para os dois tipos de revestimento, o tempo

de corte é aproximado, fixando-se em quase 19 minutos para a P15 e pouco mais de 20 minutos relativamente à P05.

Na Tabela 4.6, pode ser observado o aspeto final das faces de ataque e de saída das ferramentas utilizadas nos ensaios de corte longos. Ambas as ferramentas (P05 e P15) são apresentadas para $v_c=300$ e 150m/min , com avanço de $0,2\text{mm/rot}$ e profundidade de 2mm . Todos os ensaios foram efetuados a seco.

É visível que a ferramenta de corte P05 teve menor desgaste que a P15 tanto na face de ataque como na de saída, na situação de corte em que se tem $v_c=300\text{m/min}$. As duas tiveram maior desgaste na face de ataque (flanco) que na de saída.

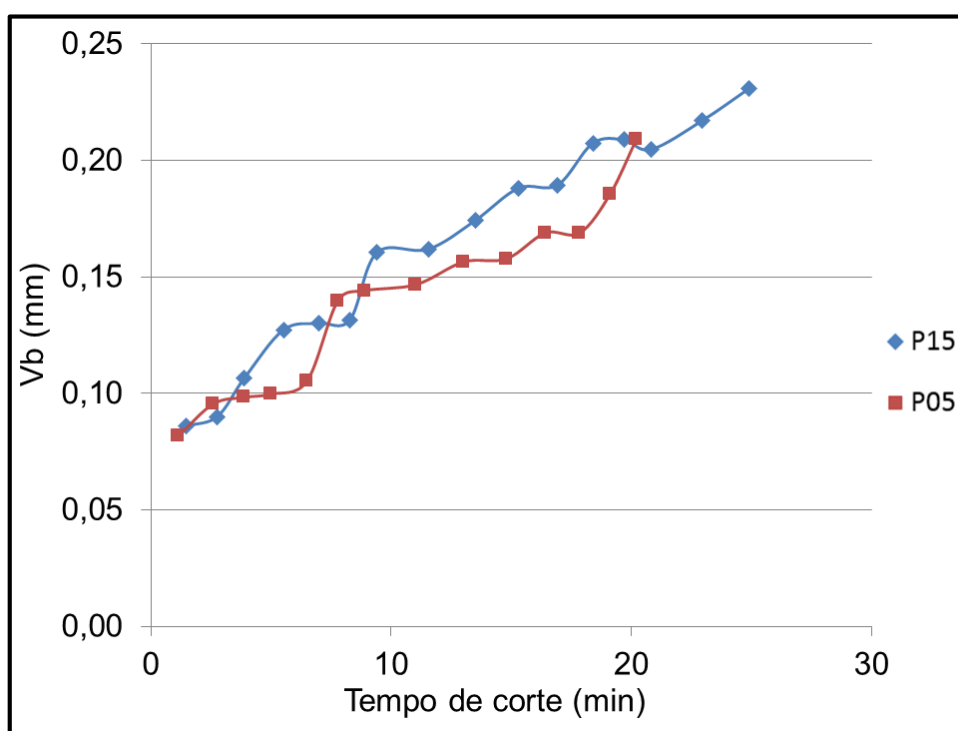


Figura 4.13 - Desgaste das ferramentas de corte em função do tempo para os parâmetros: $v_c=150\text{m/min}$; $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$

Se se passar para o caso de velocidade de corte de 150m/min , tem-se um resultado bastante diferente comparando com a situação anterior. Tanto a face de ataque como a de saída da ferramenta P05, revelam um desgaste muito superior ao da ferramenta P15. Nos dois casos o flanco apresenta maior desgaste que o bico.

Na Tabela 4.7 estão ilustrados os aspetos das faces de ataque e saída das duas ferramentas de corte utilizadas. Esta tabela é referente a outro conjunto de parâmetros, neste caso o avanço é de $0,05\text{mm/rot}$ e a profundidade de 1mm , permanecendo a velocidade de corte nos 150m/min .

No que diz respeito a este conjunto de parâmetros verifica-se um maior desgaste na face de ataque que nos outros casos. Comparando as ferramentas de corte neste caso separado, o desgaste acaba por ser idêntico nas duas em ambas as faces.

Tabela 4.6 - Desgaste (mm) das ferramentas utilizadas após ensaios de corte longos com $a=0,2\text{mm/rot}$ e $p=2\text{mm}$

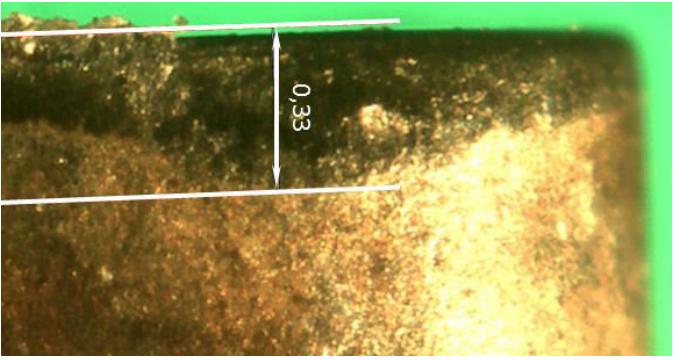
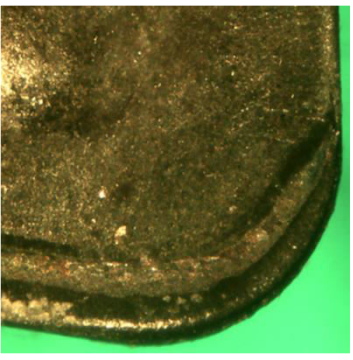
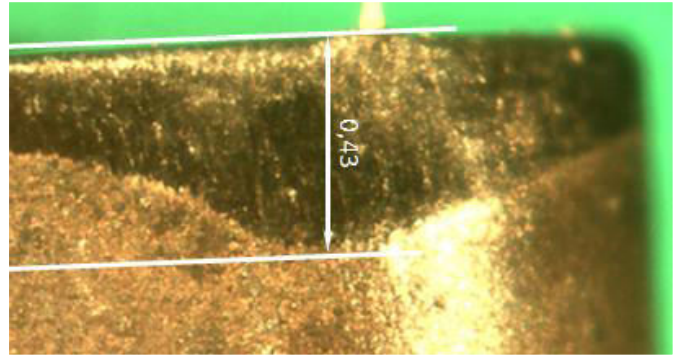
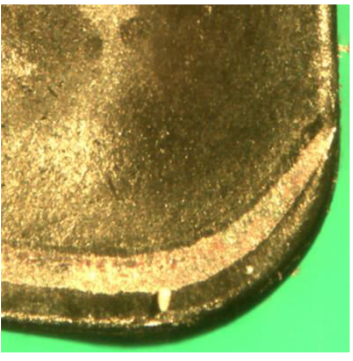
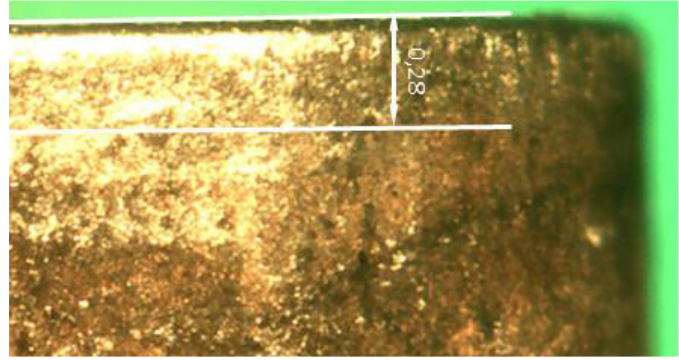
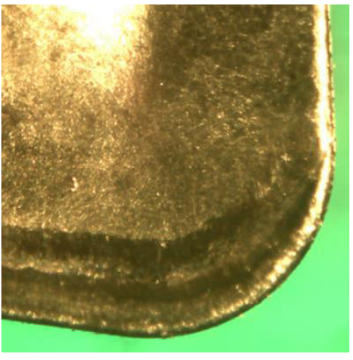
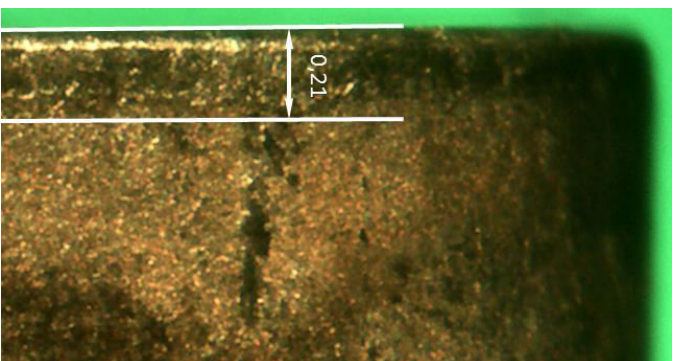

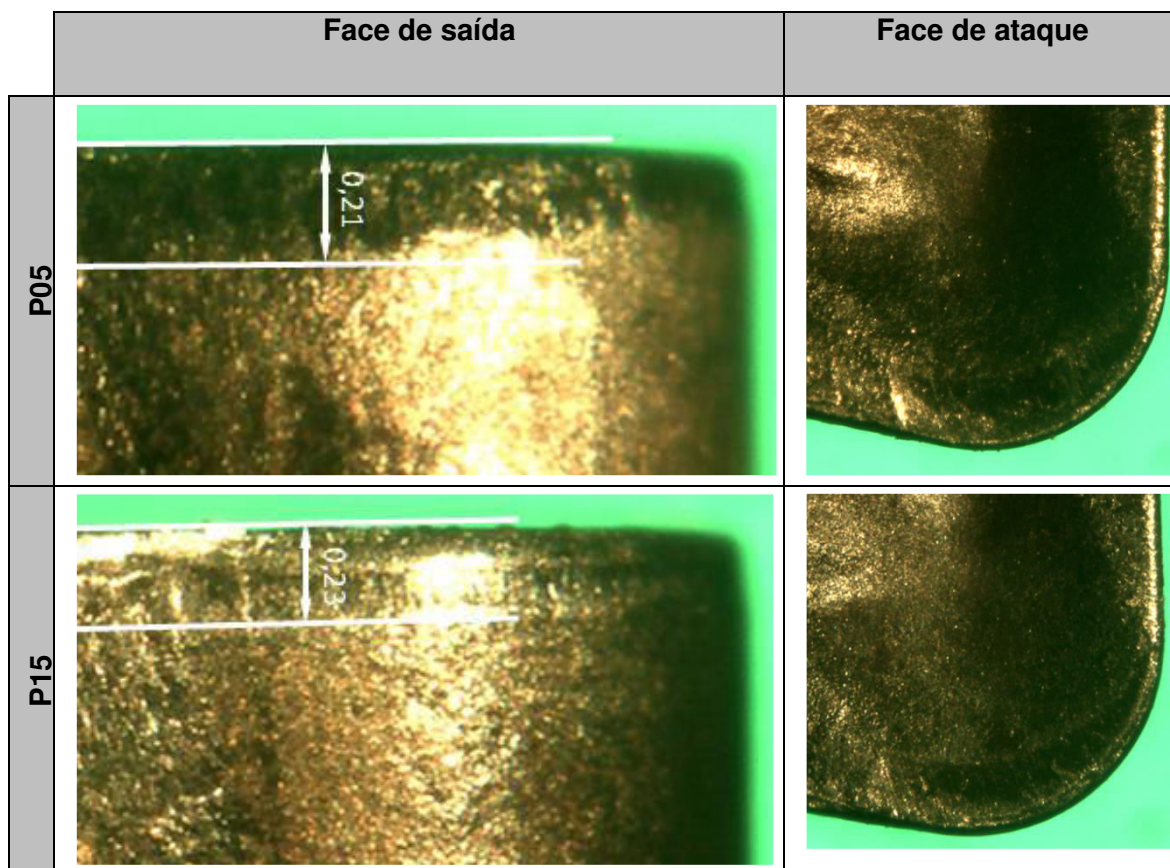
		Face de saída	Face de ataque
$v_c = 300\text{m/min}$	P05		
	P15		
$v_c = 150\text{m/min}$	P05		
	P15		

Tabela 4.7 - Desgaste (mm) das ferramentas utilizadas após ensaios de corte longos com $v_c=150\text{m/min}$, $a=0,05\text{mm/rot}$ e $p=1\text{mm}$



A Tabela 4.8 apresenta os valores de desgaste bem como o tempo de vida da ferramenta para todas as casualidades, com avanço de 0.02mm/rot e profundidade de 2mm, presentes nos ensaios de corte longos. Deste modo tornou-se possível obter uma curva do tempo de vida da ferramenta em função dos parâmetros de corte.

Tabela 4.8 – Resumo do tempo de vida e desgaste das ferramentas para os ensaios efetuados com avanço de 0.2mm/rot e profundidade de 2mm

Ferramenta	v_c (m/min)	T (min)	V_B (mm)
P05	300	2,16	0,33
	150	5,47	0,28
P15	300	1,65	0,43
	150	11,19	0,21

A curva de vida das ferramentas P05 e P15 está representada no gráfico da Figura 4.14, neste caso em função da velocidade de corte. De lembrar que esta foi variada entre 150 e 300 m/min.

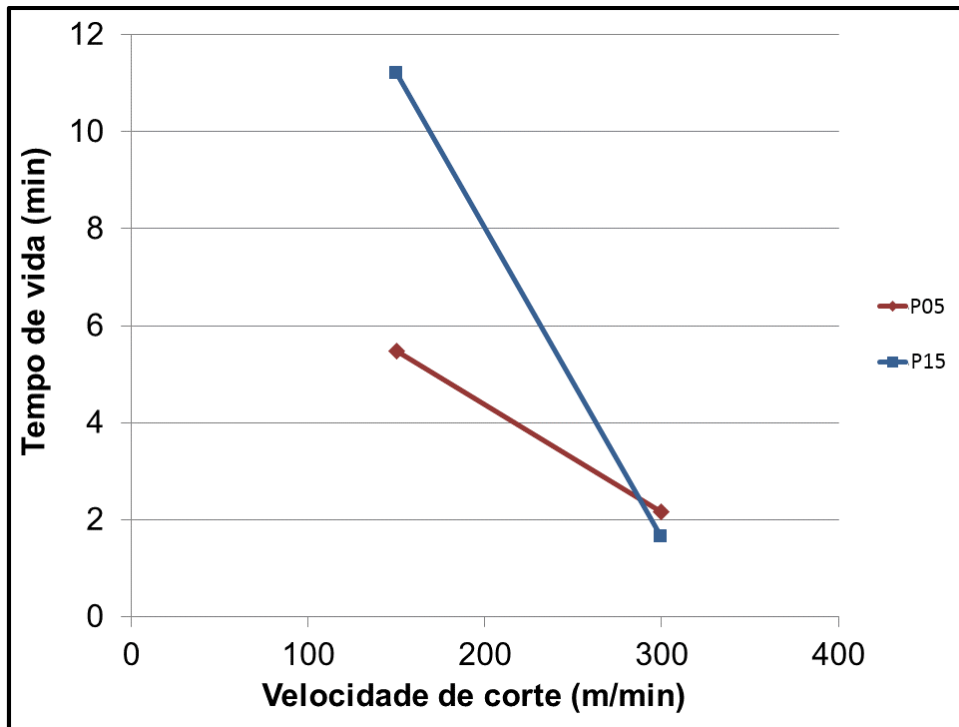


Figura 4.14 – Curva de vida das ferramentas P05 e P15 para ensaios de corte com avanço de 0,2mm/rot e profundidade de 2mm

Conclui-se pela análise da Figura 4.14 que a velocidade de corte tem grande influência no tempo de vida da ferramenta. Se para o caso da ferramenta P05 a sua vida reduz para cerca de um terço se se aumentar duas vezes a velocidade (de 150 para 300 m/min), a ferramenta P15 reduz ainda mais, passando de pouco mais de 11 minutos para menos de 2.

Elaborou-se uma curva de Taylor (equação 5) para as ferramentas em estudo a fim de determinar o tempo de vida das mesmas. Os valores de X e de K obtidos estão na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Valores de x e de K para as ferramentas P05 e P15

Ferramenta	X	K
P05	1,73	1,70E+04
P15	3,41	3,81E+08

$$T \cdot v_c^x = K \quad (5)$$

$$P05 \quad T \cdot v_c^{1,73} = 1,70 \times 10^4 \quad (6)$$

$$P15 \quad T \cdot v_c^{3,41} = 3,81 \times 10^8 \quad (7)$$

4.3 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS POR ELEMENTOS FINITOS

Com a finalidade de obter maior conhecimento do processo de corte, efetuaram-se simulações numéricas por elementos finitos, referentes às forças de corte para os três eixos, bem como simulações referentes à temperatura existente no contacto entre a ferramenta de corte e o provete (Figura 4.15).

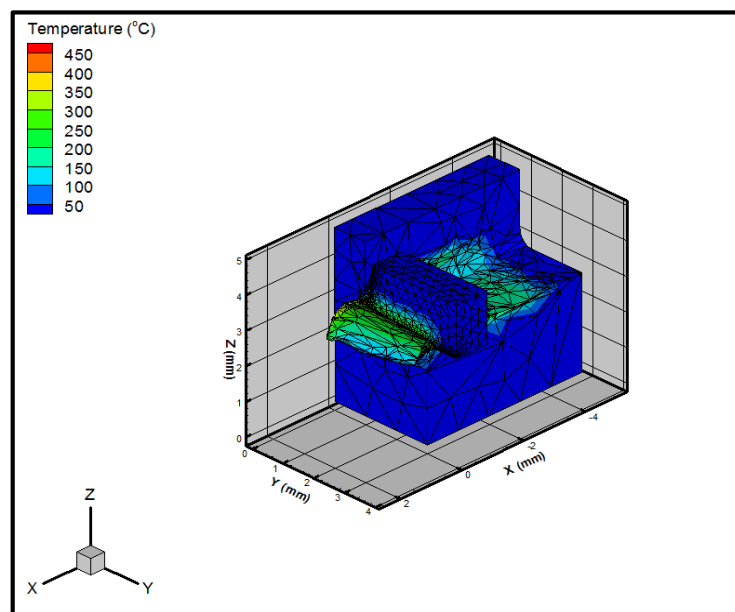


Figura 4.15 - Mapa da temperatura no processo de corte por arranque de avara

Nos ensaios com velocidade de corte de 300m/min, previram-se picos de força em X (força de corte) na ordem dos 600N, sendo o pico máximo de 601N, bastante acima dos verificados tanto em Y (força de avanço) como em Z (força de penetramento), que registaram 95 e 217N de máximo, respetivamente, como se pode constatar ao consultar os gráficos na Figura 4.16. Os valores médios dos picos podem ser consultados na Tabela

4.10. A força de corte corresponde à força em X, a força de avanço está em Y e a de penetramento em Z.

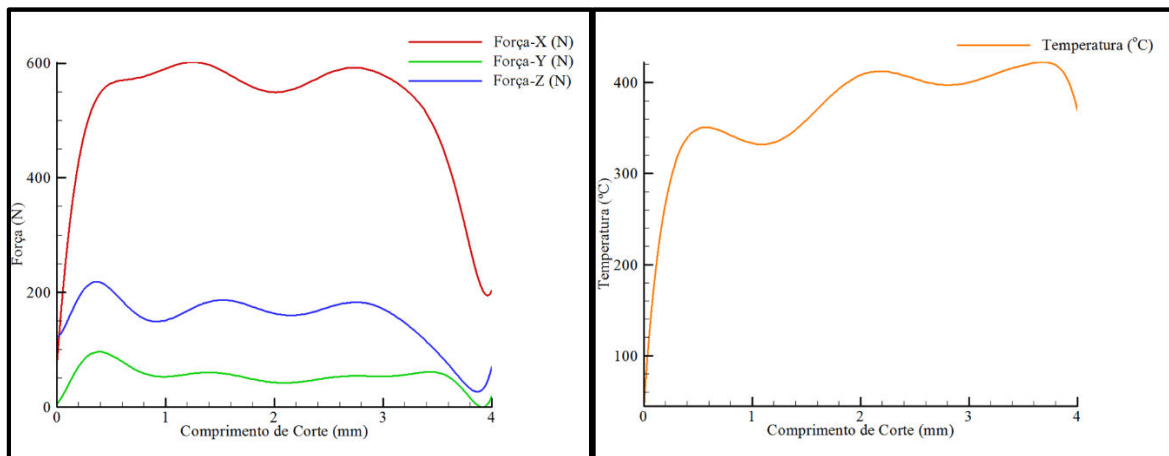


Figura 4.16 - Forças e temperaturas de corte para $v_c=300\text{m/min}$, $a=0,2\text{mm/rot}$ e $p=2\text{mm}$

No que diz respeito à temperatura presente na área de contacto entre a ferramenta de corte e o provete, esta regista 2 picos tendo o maior um valor de 422°C .

Analisando a Tabela 4.10, no caso de $v_c=150\text{m/min}$, para o avanço de $0,2\text{mm/rot}$, prevêem-se valores mais elevados na força de corte, também a rondar os 600N (592N foi a média dos valores mais altos). Em relação às outras forças surgem valores sempre abaixo de 200N , havendo uma média dos valores de pico 62N para a força de avanço e de 168N para a força de penetramento. O caso da temperatura apresenta um cenário diferente comparativamente aos valores dos testes com 300m/min de v_c , prevendo desta vez temperaturas perto de 300°C (319°C foi o máximo verificável), ou seja, cerca de 100° abaixo do registado na situação anterior.

Tabela 4.10 - Média dos valores máximos referentes às forças de corte e temperatura associadas às várias situações de corte

Situação	$v_c(\text{m/min})$	$a(\text{mm/rot})$	$p(\text{mm})$	$F_c(\text{N})$	$F_a(\text{N})$	$F_p(\text{N})$	Temperatura($^\circ\text{C}$)
1	300	0,2	2	596,4	78,1	201,5	417,6
2	150	0,2	2	592,2	61,8	168,6	314,9

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Os ensaios experimentais foram efetuados em aço de construção ligado AISI P20 utilizando ferramentas de corte de carbonetos sinterizados: P05 e P15, ambas com revestimento de tripla camada (TiCN, Al₂O₃ e TiN) adicionada com tecnologia CVD e com quebra-apara.

Primeiramente procedeu-se a uma avaliação das aparas recolhidas depois dos testes de torneamento, assim como da rugosidade da superfície do provete maquinado, através de ensaios de corte curtos.

Posteriormente analisou-se o desgaste das ferramentas de corte (V_B), recorrendo aos ensaios de corte longos, onde se analisaram também as aparas obtidas e rugosidade da superfície, à semelhança do que aconteceu na fase anterior.

Nos ensaios de corte curtos procedeu-se ainda ao estudo do efeito da utilização de fluido de corte. Também foram previstas forças e temperaturas de corte através de simulações por elementos finitos. Através da análise dos resultados obtidos ao longo de toda a experiência pode concluir-se o seguinte:

Para ensaios de corte curtos:

- O parâmetro com maior influência na alteração da forma das aparas é o avanço. Os tipos de aparas obtidas foram maioritariamente o 4.1 e 4.3.
- A rugosidade média aritmética aumenta quanto maior for o avanço. A rugosidade máxima regista o mesmo comportamento. A velocidade de corte influencia a rugosidade (aritmética e máxima) de forma menos significativa e apenas quando combinada com valores de avanço mais baixos. O parâmetro que causa maior efeito na variação do IT é o avanço.
- O uso de fluido de corte tem efeito na rugosidade ao reduzi-la. Quanto maior for o avanço, maior é a diferença entre a rugosidade verificada nos ensaios a seco e nos ensaios com uso de fluido. Também nos intervalos de tolerância (IT) se reflete uma melhoria relativamente aos ensaios a seco
- A pastilha P05 conduziu a um melhor IT com uso de fluido de corte para qualquer parâmetro. Quanto à P15, o uso de fluido só mostra influência para o avanço de 0.2mm/rot, em que apresenta melhor IT relativamente ao ensaio a seco. Comparando as

duas pastilhas, ambas apresentam todos os valores de tolerância abaixo de IT8 ($39\mu\text{m}$). A ferramenta P15 revela melhores valores de IT, entre 7 e $16\mu\text{m}$ (IT 4 e IT6 respetivamente), quando utilizados avanços mais baixos.

Para ensaios de corte longos:

- Para velocidade de corte de 150m/min os valores de rugosidade média aritmética obtidos são idênticos em ambas as ferramentas. Para 300m/min, a ferramenta P05 apresenta valores inferiores.
- A pastilha P05 tem um tempo de vida superior para $v_c = 300\text{m/min}$, apresentando o desgaste limite considerado pela norma **ISO 3685:1993**, meio minuto depois da P15. Para uma velocidade de corte menor (150m/min) a P05 demora metade do tempo da P15 a atingir 0.2mm de desgaste.
- Com um avanço de 0,05mm/rot, profundidade de 1mm e velocidade de 150m/min, a ferramenta P05 apresenta melhores resultados, demonstrando um tempo de vida superior. Estes ensaios revelaram pouco desgaste no bico da ferramenta.

Para análise das simulações numéricas por elementos finitos:

- O parâmetro que mais influencia os valores da força é o avanço. A um avanço inferior corresponde uma força de corte de valores mais reduzidos.
- O parâmetro que causa maior variação na temperatura é a velocidade de corte. Quanto maior esta for, mais elevada será a temperatura na zona de contacto entre ferramenta e provete.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A área em que se coloca este trabalho está em constante desenvolvimento e, como tal, podem considerar-se vários detalhes que se podem acrescentar ao estudo da maquinabilidade do aço AISI P20. Enumerando-os por tópicos, são eles:

- Expandir a gama de parâmetros utilizada nos ensaios experimentais;
- Testar outro tipo de ferramentas de corte, com outro tipo de revestimento e/ou geometria;
- Medição das forças e potências de corte experimentais com auxílio de um dinamómetro;
- Realização de ensaios a alta velocidade de corte.

6 REFERÊNCIAS

ABOU-EL-HOSSEIN, K. A. *et al.* - Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 182:1-3 (2007) 241–247.

ALVES, F. J. L. - **Materiais de construção mecânica II**. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2005) 1–17.

ANEIRO, Federico M.; COELHO, Reginaldo T.; BRANDÃO, Lincoln C. - Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. . ISSN 1678-5878. 30:2 (2008) 104–109. doi: 10.1590/S1678-58782008000200002.

ARMAREGO, E. J. A.; BROWN, R. H. - **The machining of metals** [Em linha]. [S.l.] : Prentice-Hall, 1969. 437 p. [Consult. 9 oct. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://books.google.pt/books/about/The_machining_of_metals.html?id=Rd5SAAAAMAAJ&pgis=1>.

ARSECULARATNE, J. A.; ZHANG, L. C.; MONTROSS, C. - Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 46:5 (2006) 482–491. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.015.

BHUIYAN, M. S. H.; CHOUDHURY, I. A.; DAHARI, M. - Monitoring the tool wear, surface roughness and chip formation occurrences using multiple sensors in turning. **Journal of Manufacturing Systems**. . ISSN 02786125. In Press:(2014). doi: 10.1016/j.jmsy.2014.04.005.

BUDAK, E.; ALTINTAS, Y.; ARMAREGO, EJA - Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. 118:(1996) 224.

BUDERUS - **Tool Steels for the Plastics Industry**, 2010

CALVEZ, C. L. *et al.* - Rough milling characterization and optimization of steels for plastic injection molds. In **Proceedings of the CIRP Workshop on Machining of Dies and Molds**. Paris : [s.n.]

CHINCHANIKAR, Satish; CHOUDHURY, S. K. - Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. . ISSN 02634368. 38:(2013) 124–133. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2013.01.013.

COLLINS, Patrick *et al.* - **CNC Application and Design by**. [S.l.] : Worcester Polytechnic Institute, 2011

COSTA, Eleani Maria Da - **Classificação de Aços**. Departamento de Engenharia Mecânica. Pontífica Universidade Católica do Rio Grande do Sul (2008) 127.

DAVIM, J. P.; CORREIA, A. Esteves - **Maquinagem a alta velocidade: fresagem - CNC** [Em linha]. [S.l.] : PUBLINDUSTRIA, 2006. 204 p. [Consult. 16 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://books.google.com/books?id=-qSEPgAACAAJ&pgis=1>. ISBN 9728953054.

DAVIM, João Paulo - **Princípios de Maquinagem**. Porto : Publindústria, 2008. 288 p.

DAWSON, Ty G.; KURFESS, Thomas R. - Tool life, wear rates, and surface quality in hard turning Georgia Institute of Technology. (1995).

DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L. - The surface roughness in turning process: criterion of tool life and its relationship with tool wear. (1992).

FALLBÖHMER, P. *et al.* - High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**. 98:(2000) 104–115.

FERRARESI, **Fundamentos de usinagem dos metais**, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 513-534, 1997

GALOPPI, Gustavo De Siqueira; FILHO, Marco Stipkovic; BATALHA, Gilmar Ferreira - Torneamento de aço 100Cr6 temperado com insertos de CBN com e sem cobertura. In **3 COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Joinville : [s.n.]

GIOVANETTI, Antônio - Novas alternativas para a usinagem de aços. **O mundo da usinagem**. (2008) 30 – 36.

GLAESER, W.A., **Materials for tribology**. Elsevier, London, 1992.

GROOVER, M.P., **Fundamentals of modern manufacturing**, 2ª Ed., John Wiley & Sons, inc., 2002.

GRZESIK, W. **A revised model for predicting surface roughness in turning**. *Wear*, 194:(1996) (1-2), 143–148. doi:10.1016/0043-1648(95)06825-2

GUPTA, Anil; SINGH, Hari; AGGARWAL, Aman - Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel. **Expert Systems with Applications**. . ISSN 09574174. 38:6 (2011) 6822–6828. doi: 10.1016/j.eswa.2010.12.057.

HELLENO, André Luis - **Investigação de métodos de interpolação para trajetória da ferramenta na usinagem de moldes e matrizes com alta velocidade**. [S.l.] : Universidade Metodista de Peracicaba, 2004. 140 f.

HOSEINY, H. *et al.* - The effect of the martensitic packet size on the machinability of modified AISI P20 prehardened mold steel. **Journal of Materials Science**. . ISSN 0022-2461. 47:8 (2012) 3613–3620. doi: 10.1007/s10853-011-6208-y.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven - **Manufacturing Engineering & Technology** [Em linha]. [S.l.] : Pearson Education, 2002 [Consult. 9 oct. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://books.google.com/books?id=_ZcvAAAAQBAJ&pgis=1>. ISBN 0133151212.

KLOCKE, F.; EISENBLATTER, G. Dry Cutting, Keynote Papers : 46:2 (1997).

KLOCKE, Fritz; KUCHLE, Aaron - **Manufacturing Processes 1: Cutting** [Em linha]. [S.l.] : Springer Science & Business Media, 2011. 524 p. [Consult. 9 oct. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://books.google.com/books?id=Kcdfs_dwLFUC&pgis=1>. ISBN 3642119794.

MAMALIS, A. G., HORVÁTH, M., BRANIS, A. S. & MANOLAKOS, D. E. 1999. Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, 110, 19-27.

MAEKAWA, K. *et al.* - Simulation analysis of machinability of leaded Cr-Mo and Mn-B structural steels. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 62:4 (1996) 363–369. doi: 10.1016/S0924-0136(96)02436-3.

MERCHANT M.E. J., **Applied Physics**. 66, 1944, 168

MESQUITA R.M. e MARQUES, M.J. **Análise experimental da Maquinabilidade dos materiais e do desempenho das ferramentas de corte.** 4 congresso da SPM, V. II, Coimbra, 189-200, 1989

MEUSBURGER - **Aço AISI P20+Ni** [Em linha], atual. 2013. Disponível em WWW:<URL:http://www.meusburger.com/media/files/Materialqualitaeten/Materialqualitaeten_E.pdf>.

MITUTOYO, Departamento De Treinamento - **Rugosidade**. 43.

MORAIS, Simões - **Desenho Técnico Básico 3, Simões Morais** [Em linha], atual. 2006. [Consult. 31 oct. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://www.fnac.pt/Desenho-Tecnico-Basico-3-Simoes-Morais/a180490>.

OLIVEIRA, Valter Vander De - Influência do revestimento na vida útil de brocas de metal duro na usinagem do aço AISI P20. 2009 (2010).

ÖZEL, T.; ALTAN, T. - Determination of workpiece flow stress and friction at the chip–tool contact for high-speed cutting. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. . ISSN 08906955. 40:1 (2000) 133–152. doi: 10.1016/S0890-6955(99)00051-6.

POULACHON, G.; MOISAN, A.; JAWAHIR, I. S. - Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. **Wear**. . ISSN 00431648. 250:1-12 (2001) 576–586. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00609-3.

PUSAVEC, Franci; KRAJNIK, Peter; KOPAC, Janez - Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**. . ISSN 09596526. 18:2 (2010) 174–184. doi: 10.1016/j.jclepro.2009.08.010.

RECH, J.; CALVEZ, C. L.; DESSOLY, M. - A new approach for the characterization of machinability—application to steels for plastic injection molds. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 152:1 (2004) 66–70. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.03.010.

SAHOO, Ashok Kumar; SAHOO, Bidyadhar - Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Measurement**. . ISSN 02632241. 45:8 (2012) 2153–2165. doi: 10.1016/j.measurement.2012.05.015.

ŠALAK, Andrej; VASILKO, Karol; SELECKÁ, Marcela - Machinability of Sintered Steels in Face Turning : Effect of Cutting Speed and Tool Grade Obrábate ľ nos ľ spekaných ocelí č elným sústružením : Vplyv rýchlosti obrábania a druhu rezného nástroja. (2005) 5–10.

SANDVIK COROMANT - **Metalcutting Technical Guide**. [S.l.] : Sandvik, 2012

SCHULTHEISS, Fredrik *et al.* - Influence of the Minimum Chip Thickness on the Obtained Surface Roughness During Turning Operations. **Procedia CIRP**. . ISSN 22128271. 13:1 (2014) 67–71. doi: 10.1016/j.procir.2014.04.012.

SILVA, L. R. *et al.* - Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. (2004).

SOARES, Joaquim Pinto - **Aços para Ferramentas - Características Tratamentos Aplicações**. Porto : Publindústria, 2009. 371 p.

STOIĆ, A.; KOPAČ, J.; CUKOR, G. - Testing of machinability of mould steel 40CrMnMo7 using genetic algorithm. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 164-165:(2005) 1624–1630. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.01.013.

SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, MS - Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 49:(2009) 568.

THYSSENKRUPP - **Propriedades mecânicas e físicas do Aço AISI P20+Ni** [Em linha], atual. 2013. Disponível em WWW:<URL:http://www.thyssenfrance.com/fich_tech_en.asp?product_id=11455&transfo=yes>.

TINKEN - **Steel** [Em linha], atual. 2013. Disponível em WWW:<URL:http://www.timken.com/pt-br/products/Steel/productlist/types/Pages/NickelChromium.aspx#top>.

UHLMANN, E. *et al.* - Influence of inclusion contents on the micro-machinability of three plastic mold steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. . ISSN 0268-3768. 68:9-12 (2013) 2451–2460. doi: 10.1007/s00170-013-4835-y.

VIVANCOS, J. *et al.* - Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 155-156:(2004) 1505–1512. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.260.

WRIGHT, Paul K.; TRENT, E. M. - **Metal Cutting: Fourth Edition** [Em linha] [Consult. 9 oct. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://books.google.pt/books/about/Metal_Cutting.html?id=omtl803CoKoC&pgis=1>. ISBN 0080511457.

ZEILMANN, Rodrigo P. *et al.* - Implications of the reduction of cutting fluid in drilling AISI P20 steel with carbide tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. . ISSN 0268-3768. 58:5-8 (2011) 431–441. doi: 10.1007/s00170-011-3401-8.

ANEXOS

Anexo A - Programa CNC utilizado para realizar os ensaios de corte curtos

N10	G21 G90 G95 G40	Unidades sistema métrico; Sistema de coordenadas absolutas. Avanço em mm/rot; Cancelamento compensação de <i>off-set</i> .
N20	G28 U0	Retorno ao ponto de referência-máquina. Ponto Segurança.
N30	G92 S3000	Limitação da rotação máxima da árvore.
N40	T12 12	Chamada da ferramenta nº 12.
N50	G96 S80 M04	Velocidade de corte constante de 80 m/min. Rotação da árvore no sentido anti horário.
N60	G00 X100. Z5.	Avanço rápido para ponto de aproximação.
N70	X96	Descida da árvore à coordenada pretendida.
N80	G01 Z-20 F0.05	Interpolação linear à respetiva coordenada.
N90	G00 X100	Movimento rápido a ponto de segurança.
N100	G01 X96	Aproximação da ferramenta ao contorno.
N110	G01 Z-30 F0.10	Interpolação linear à respetiva coordenada.
N120	G00 X100	Movimento rápido a ponto de segurança.
N130	G01 X96	Aproximação da ferramenta ao contorno.
N140	G01 X-60 F0.2	Interpolação linear à respetiva coordenada.
N150	G00 X100	Movimento rápido a ponto de segurança.
N160	G01 X96	Aproximação da ferramenta ao contorno.
N170	G01 X-80 F0.40	Interpolação linear à respetiva coordenada.
N180	G00 Z100	Movimento rápido a ponto de segurança.
N190	Z5	Movimento rápido a ponto de segurança.
N200	G28 U0	Retorno ao ponto de referência-máquina. Ponto Segurança.
N210	M30	Fim de programa.

Anexo B - Programa CNC utilizado nos ensaios de corte longos

N10	G21 G90 G95 G40	Unidades sistema métrico. Sistema de coordenadas absolutas. Avanço em mm/rot. Cancelamento compensação de <i>off-set</i> .
N20	G28 U0	Retorno ao ponto de referência-máquina. Ponto Segurança.
N30	G92 S3000	Limitação da rotação máxima da árvore.
N40	T12 12	Chamada da ferramenta nº 12.
N50	G96 S80 M04	Velocidade de corte constante de 80 m/min. Rotação da árvore no sentido anti horário.
N60	G00 X100. Z5.	Avanço rápido para ponto de aproximação.
N70	X45	Descida da árvore à coordenada pretendida.
N80	G01 Z-102 F0.2	Interpolação linear à respetiva coordenada.
N90	G00 X100	Movimento rápido a ponto de segurança.
N190	Z5	Movimento rápido a ponto de segurança.
N200	G28 U0	Retorno ao ponto de referência-máquina. Ponto Segurança.
N210	M30	Fim de programa.

Anexo C - Desgaste observado e comprimento total maquinado após cada ensaio

Pastilha		4205		4215	
Velocidade (m/min)		150	300	150	300
Ensaio	Comprimento (mm)	Desgaste (μm)			
1	102	0,0000	0,0692	0,0650	0,0650
2	204	0,0498	0,0788	0,0719	0,1092
3	306	0,0871	0,1231	0,0816	0,1466
4	408	0,1189	0,1359	0,0996	0,1646
5	510	0,1632	0,1605	0,1023	0,2143
6	612	0,1632	0,2033	0,1052	0,2683
7	714	0,1632	0,2268	0,1162	0,4342
8	816	0,1632	0,2757	0,1203	
9	918		0,3334		
10	1020	0,1938		0,1300	
12	1224			0,1410	
13	1326	0,1991			
14	1428	0,2835		0,1535	
16	1632			0,1328	
18	1836			0,1522	
21	2142			0,1659	
24	2448			0,1728	
28	2652			0,1912	
29	2958			0,2136	

Anexo D - Valores de desgaste e comprimento maquinado a inserir nas equações 8 e 9

Pastilha	4205		4215	
v_c (m/min)	(v_{c1})	(v_{c2})	(v_{c1})	(v_{c2})
	150	300	150	300
V_B (μm)	Comprimento Total Maquinado			
0,010	137,5	123,9	48,5	139,9
0,020	152,0	133,3	61,9	146,7
0,030	168,1	143,3	79,1	153,9
0,040	185,9	154,2	101,0	161,3
0,050	205,5	165,8	128,9	169,1
0,060	227,3	178,3	164,6	177,4
0,070	251,3	191,8	210,2	186,0
0,080	277,9	206,3	268,4	195,0
0,090	307,3	221,9	342,8	204,4
0,100	339,8	238,7	437,7	214,4
0,110	375,7	256,7	558,8	224,8
0,120	415,4	276,2	713,6	235,7
0,130	459,4	297,0	911,1	247,1
0,140	508,0	319,5	1163,4	259,1
0,150	561,7	343,6	1485,6	271,7
0,160	621,1	369,6	1896,9	284,8
0,170	686,8	397,5	2422,1	298,6
0,180	759,4	427,6	3092,7	313,1
0,190	839,8	459,9	3949,0	328,3
0,200	928,6	494,7	5042,4	344,3
0,210	1026,8	532,1	6438,6	361,0
0,220	1135,4	572,3	8221,3	378,5
0,230	1255,5	615,6	10497,6	396,8
0,240	1388,3	662,1	13404,2	416,1
0,250	1535,1	712,1	17115,6	436,3
0,260	1697,5	766,0	21854,5	457,4
0,270	1877,0	823,9	27905,6	479,6
0,280	2075,5	886,1	35632,2	502,9
0,290	2295,1	953,1	45498,0	527,3
0,300	2537,8	1025,2	58095,5	552,9

$$\log \frac{I_{T_1}}{I_{T_2}} = (1-x) \cdot \log \frac{v_{c_1}}{v_{c_2}} \quad (8)$$

$$K = \frac{I_T \cdot \pi \cdot d}{f \cdot 1000 \cdot v_c} \cdot v_c^x \quad (9)$$

Onde,

v_c é a velocidade de corte;

l_f é o comprimento de corte;

d é o valor do diâmetro médio;

f é o avanço por rotação.

Anexo E - Valores de X e K obtidos

V_B (μm)	Fator X		Fator K	
	4205	4215	4205	4215
0,01	1,150086	-0,24	3,73E+03	3,95E+07
0,02	1,190004	0,02	4,06E+03	4,20E+07
0,03	1,229922	0,27	4,42E+03	4,47E+07
0,04	1,26984	0,52	4,81E+03	4,78E+07
0,05	1,309758	0,77	5,23E+03	5,12E+07
0,06	1,349676	1,02	5,69E+03	5,51E+07
0,07	1,389594	1,27	6,20E+03	5,96E+07
0,08	1,429512	1,52	6,75E+03	6,47E+07
0,09	1,46943	1,77	7,35E+03	7,06E+07
0,1	1,509347	2,03	8,01E+03	7,74E+07
0,11	1,549265	2,28	8,73E+03	8,55E+07
0,12	1,589183	2,53	9,51E+03	9,50E+07
0,13	1,629101	2,78	1,04E+04	1,06E+08
0,14	1,669019	3,03	1,13E+04	1,20E+08
0,15	1,708937	3,28	1,23E+04	1,36E+08
0,16	1,748855	3,53	1,34E+04	1,55E+08
0,17	1,788773	3,79	1,47E+04	1,79E+08
0,18	1,828691	4,04	1,60E+04	2,08E+08
0,19	1,868609	4,29	1,74E+04	2,43E+08
0,2	1,908527	4,54	1,90E+04	2,87E+08
0,21	1,948445	4,79	2,08E+04	3,40E+08
0,22	1,988363	5,04	2,27E+04	4,05E+08
0,23	2,028281	5,29	2,48E+04	4,86E+08
0,24	2,068198	5,54	2,71E+04	5,86E+08
0,25	2,108116	5,80	2,96E+04	7,10E+08
0,26	2,148034	6,05	3,23E+04	8,63E+08
0,27	2,187952	6,30	3,53E+04	1,05E+09
0,28	2,22787	6,55	3,86E+04	1,29E+09
0,29	2,267788	6,80	4,22E+04	1,58E+09
0,3	2,307706	7,05	4,61E+04	1,95E+09
Valor médio	1,73	3,41	1,70E+04	3,81E+08

Anexo F - Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos com a ferramenta P05

Parâmetros de corte	Profundidade de corte=2mm											
	v _c =150m/min			v _c =300m/min			v _c =450m/min			v _c =300m/min(lub)		
	a=0,05 mm/rot	a=0,1 mm/rot	a=0,2 mm/rot	a=0,05 mm/rot	a=0,1 mm/rot	a=0,2 mm/rot	a=0,05 mm/rot	a=0,1 m/rot	a=0,2 mm/rot	a=0,0 mm/rot	a=0,1 mm/rot	a=0,2 mm/rot
Ra	0,79	0,67	1,28	0,55	0,62	1,27	0,44	0,58	1,29	0,38	0,57	1,14
Rt	6,26	4,03	4,91	3,91	2,70	4,29	2,81	2,61	5,47	2,04	2,77	4,67

Anexo G - Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de corte curtos com a ferramenta P05

Parâmetros de corte	Profundidade de corte=2mm											
	v _c =150m/min			v _c =300m/min			v _c =450m/min			v _c =300m/min(lub)		
	a=0,05 mm/rot	a=0,1 mm/rot	a=0,2 mm/rot	a=0,05 mm/rot	a=0,1 mm/rot	a=0,2 mm/rot	a=0,05 mm/rot	a=0,1 m/rot	a=0,2 mm/rot	a=0,0 mm/rot	a=0,1 mm/rot	a=0,2 mm/rot
Ra	0,51	0,47	1,01	0,25	0,33	1,09	0,35	0,35	1,07	0,29	0,31	0,90
Rt	5,19	4,29	4,42	1,71	2,47	4,47	3,28	1,95	4,71	1,85	2,49	3,98

Anexo H - Valores de IT normalizados para um diâmetro nominal entre 30 e 50 mm

IT	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
μm	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900

Anexo I - Valores de IT obtidos com a ferramenta P05

Avanço (mm/rot)	v _c =150m/min	v _c =300m/min	v _c =450m/min	v _c =300m/min(lub)
0,05	23,8	16,5	13,2	11,4
0,1	20,2	18,5	17,4	17,0
0,2	38,3	38,0	38,6	34,1

Anexo J - Valores de IT obtidos com a ferramenta P15

Avanço (mm/rot)	v _c =150m/min	v _c =300m/min	v _c =450m/min	v _c =300m/min(lub)
0,05	15,3	7,5	10,5	8,6
0,1	14,2	10	10,6	9,2
0,2	30,3	32,7	32,2	27

Anexo K - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P05 ($v_c=300$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).

Ensaio	Tempo somado(s)	V_B (mm)	Ra médio(μ m)	Rt médio(μ m)
1	0,27	0,07	1,05	6,74
2	0,52	0,08	0,90	6,91
3	0,75	0,12	0,71	5,02
4	0,96	0,14	0,97	7,05
5	1,23	0,16	0,63	4,63
6	1,48	0,20	0,74	5,33
7	1,69	0,23	0,65	6,37
8	1,89	0,28	0,99	9,73
9	2,16	0,33	1,00	8,26

Anexo L - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P15 ($v_c=300$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).

Ensaio	Tempo somado(s)	V_B (mm)	Ra médio(μ m)	Rt médio(μ m)
1	0,25	0,07	1,41	7,55
2	0,48	0,11	1,36	5,40
3	0,69	0,15	1,32	5,56
4	0,96	0,16	1,31	6,24
5	1,21	0,21	1,06	4,27
6	1,44	0,27	1,02	4,21
7	1,65	0,43	1,01	3,99

Anexo M - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P05 ($v_c=150$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).

Ensaio	Tempo somado(s)	V_B (mm)	Ra médio(μ m)	Rt médio(μ m)
1	0,28	0,00	1,28	5,25
2	0,65	0,05	1,27	5,33
3	0,97	0,09	1,28	5,41
4	1,25	0,12	1,19	5,02
5	1,62	0,16	1,05	6,74
6	1,94	-	0,90	6,91
7	2,23	-	0,71	5,02
8	2,76	-	0,97	7,05
9	3,25	-	0,63	4,63
10	3,70	-	0,74	5,33
11	4,10	-	0,65	6,37
12	4,46	-	0,99	9,73
13	4,78	0,20	1,00	8,26
14	5,05	0,28	1,01	8,34

Anexo N - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P15 ($v_c=150$ m/min, $a=0,2$ mm/rot, $p=2$ mm).

Ensaio	Tempo somado(s)	V_B (mm)	Ra médio(μ m)	Rt médio(μ m)
1	0,37	0,07	1,10	4,62
2	0,69	0,07	1,05	5,69
3	0,97	0,08	1,06	5,08
4	1,38	0,10	1,14	
5	1,75	0,10	1,05	4,55
6	2,07	0,11	0,96	4,25
7	2,35	0,12	1,04	5,44
8	2,89	0,12	1,07	4,91
9	3,38	-	-	-
10	3,83	0,13	1,04	4,62
11	4,24	-	-	-
12	4,60	0,14	1,01	4,39
13	4,93	-	-	-
14	5,21	0,15	0,96	4,60
15	5,74	-	-	-
16	6,23	0,13	1,06	5,23
17	6,67	-	-	-
18	7,07	0,15	1,05	4,55
19	7,43	-	-	-
20	7,74	-	-	-
21	8,01	0,17	1,03	5,00
22	8,52	-	-	-
23	8,99	-	-	-
24	9,42	-	0,97	-
25	9,80	-	-	-
26	10,14	0,19	-	-
27	10,44	-	-	-
28	10,70	-	0,96	5,40
29	11,19	0,21	-	5,26

Anexo O - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P05 ($v_c=150$ m/min, $a=0,05$ mm/rot, $p=1$ mm).

Ensaio	Tempo somado(s)	V_B (mm)	Ra médio(μ m)	Rt médio(μ m)
1	1,13	0,08	1,05	6,74
2	2,59	0,10	0,90	6,91
3	3,89	0,10	0,71	5,02
4	5,02	0,10	0,97	7,05
5	6,48	0,11	0,63	4,63
6	7,78	0,14	0,74	5,33
7	8,91	0,14	0,65	6,37
8	11,04	0,15	0,99	9,73
9	13,01	0,16	1,00	8,26
10	14,80	0,16	1,01	8,34
11	16,41	0,17	0,95	7,75
12	17,84	0,17	1,17	9,18
13	19,10	0,19	1,52	12,45
14	20,20	0,21	1,60	11,55

Anexo P - Parâmetros de desgaste e rugosidade obtidos nos ensaios de corte longos a seco com a ferramenta P15 ($v_c=150$ m/min, $a=0,05$ mm/rot, $p=1$ mm).

Ensaio	Tempo somado(s)	V_B (mm)	Ra médio(μ m)	Rt médio(μ m)
1	1,46	0,09	0,69	5,06
2	2,76	0,09	0,93	8,27
3	3,89	0,11	0,57	4,83
4	5,52	0,13	0,99	7,82
5	6,98	0,13	1,61	12,05
6	8,28	0,13	1,40	9,23
7	9,41	0,16	1,80	10,37
8	11,54	0,16	1,29	8,86
9	13,51	0,17	1,76	11,90
10	15,31	0,19	1,34	8,75
11	16,94	0,19	-	-
12	18,41	0,21	1,13	8,51
13	19,70	0,21		-
14	20,83	0,20	1,73	12,49
15	22,97	0,22	1,70	11,17
16	24,92	0,23	1,53	11,85