

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO
AISI M4 ENDURECIDO, UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
PROJETO DE EXPERIMENTOS.**

Autor: **Marcelo Bonandi**

Orientador: **Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini**

São Paulo, Novembro de 2012.

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO
AISI M4 ENDURECIDO, UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
PROJETO DE EXPERIMENTOS.**

Autor: **Marcelo Bonandi**

Orientador: **Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini**

Curso: **Mestrado em Engenharia de Produção**

Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado em Engenharia de Produção como
parte dos requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia de Produção

São Paulo, Novembro de 2012.

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO
AISI M4 ENDURECIDO, UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
PROJETO DE EXPERIMENTOS.**

Autor: **Marcelo Bonandi**

Orientador: **Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Elesandro A. Baptista

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

FICHA CATALOGRÁFICA

Bonandi, Marcelo

Estudo das condições de corte no torneamento do aço AISI M4 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos.

Dissertação de Mestrado – Universidade Nove de Julho: São Paulo, SP; 2012

1. Torneamento de materiais endurecidos; 2. Ferramentas de CBN; 3. Aço AISI M4; 4. Rugosidade superficial

Dedicatória

A toda minha família, em especial a minha esposa Camila, ao meu filho Pietro e a meus pais Antonio e Marli que compartilham comigo aprendizados imprescindíveis para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, orientador, pela confiança transmitida durante todo este trabalho e que contribuiu para o aperfeiçoamento da minha carreira profissional.

Aos amigos da empresa, em especial aqueles que apesar das responsabilidades encontram tempo para dividir conhecimentos e experiência.

Aos professores do Departamento de Pós-Graduação de Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho, em especial aos professores Milton Vieira Junior e Elesandro A. Baptista pela oportunidade concedida na realização deste trabalho.

Aos funcionários da Universidade Nove de Julho que fizeram parte deste projeto, em especial ao Alex Martins Mendes da Costa, que sempre encontrou uma oportunidade para contribuir para o desenvolvimento deste trabalho.

A Sandvik do Brasil pelo incentivo à pesquisa científica, por meio da doação dos insertos de usinagem, materiais e instrumentos de medição utilizados nos experimentos.

A todos os colegas que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste projeto.

A Deus por mais esta etapa de vida.

*Subimos às alturas principalmente
através das ruínas dos nossos caros projetos,
vendo nos nossos fracassos apenas sinais amigos
que nos conduzem ao alto, para o triunfo.*

Napoleon Hill

Índice

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xiii
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	1
Capítulo 2	4
2. Revisão da Literatura	4
2.1 Processo de torneamento	4
2.2 Condições de corte.....	7
2.3 Torneamento de aços endurecidos	10
2.4 Ferramentas de corte para o torneamento duro.....	14
2.4.1 Avarias e desgastes de ferramentas de corte	18
2.5 Torneamento a seco	22
2.6 Rugosidade superficial.....	24
2.7 Pesquisa experimental.....	32
2.8 Experimentos fatoriais com dois ou mais fatores.....	37
Capítulo 3	39
3. Experimentação.....	39
3.1 Máquina ferramenta.....	40
3.2 Material usinado	40
3.3 Ferramentas de Corte	42
3.4 Parâmetros	43
3.5 Medição das variáveis de saída.....	44
3.5.1 Medição de rugosidade (Ra).....	44
3.5.2 Medição do desgaste da ferramenta (Vb)	45
3.5.3 Medição da circularidade (C)	46
3.5.4 Medição de dureza (HRC).....	46

3.6	Procedimentos experimentais dos ensaios	47
Capítulo 4	49
4.	Resultados e Discussão	49
4.1	Análise da Rugosidade de Saída	49
4.2	Circularidade das superfícies usinadas	61
4.3	Desgaste e avarias na ferramenta de corte	64
4.4	Experimentos de comparação sem lubrificação.....	66
Capítulo 5	71
5.	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	72
Referências Bibliográficas	73

Resumo

Bonandi, Marcelo (2012), *Estudo das condições de corte no torneamento do aço AISI M4 endurecido utilizando a metodologia de projeto de experimentos*. São Paulo: Universidade Nove de Julho, Dissertação de Mestrado.

O cenário atual, resultado da crise global, tem provocado enormes mudanças na indústria metal mecânica. Já é sabido que o mercado globalizado provocou movimentos de mudança no meio competitivo por meio do desenvolvimento de novos métodos, processos e materiais para fabricação de componentes cada vez mais eficientes e com menor custo. Em especial, segmentos do mercado onde existe um aparente conflito, entre a produção de *commodities* e produtos de alta tecnologia, a cobrança por redução de custos é ainda maior e o investimento em tecnologia se faz necessário para a sobrevivência do negócio. A produção de matrizes para conformação de embalagens a frio é um exemplo desta tendência global e a exigência por produtos cada vez mais eficientes aumentam no segmento a utilização do processo de torneamento duro, em substituição a retifica convencional para o processo de acabamento de materiais de alta complexidade de perfil. O torneamento duro surge então como resposta ao cenário de crise externa, permite reduzir custos e manter a competitividade em um mercado cada vez mais exigente; (Kress, 2001), (Matsumoto, 1998). Sendo assim, a escolha adequada das ferramentas de corte e parâmetros de usinagem é essencial para este sucesso. Neste trabalho é realizado um estudo das condições de usinagem das ferramentas de CBN no aço AISI M4 endurecido a 64 HRC, o qual é aplicado em matrizes no segmento de embalagens, aplicando-se a metodologia de Projeto de Experimentos (DOE). O DOE torna mais eficiente à avaliação dos resultados dos experimentos e sua metodologia pode ser replicada para diferentes variáveis facilitando a comparação deste trabalho. Foi analisado o acabamento superficial da peça como saída principal e adotada uma rugosidade $Ra < 0,2\mu\text{m}$ como critério qualidade do corpo de prova. Todos os parâmetros de corte contribuíram para a rugosidade superficial e circularidade, enquanto que a variação do avanço mostrou influência significativa no resultado final da peça.

Palavras chave

Torneamento de materiais endurecidos, Ferramentas de CBN, Aço AISI M4, rugosidade superficial.

Abstract

Bonandi, Marcelo (2012), *Study of cut conditions on turning hardened steel AISI M4 using design of experiment methodology*. São Paulo: Universidade Nove de Julho, Master's Degree.

The current scenario, as a result of the global crisis, has caused huge changes in the metalworking industry. It is known that the global market movements caused change in a competitive environment by developing new methods, procedures and materials for making components for more efficient and lower cost. In particular, market segments where there is an apparent conflict between the production of commodities and products of high technology where the request for cost reduction and investment in technology is even greater and necessary for business survival. The production of dies for cold forming of packaging is an example of this global trend. The demand for efficient products have been increasing in the segment the hard turning process, replacing the conventional grinding process of finishing materials where high complexity profile is needed. The hard turning is a response to external crisis scenario, to cut costs and remain competitive in an increasingly demanding market. Thus, the proper choice of cutting tools and machining parameters is essential for the success. This work is a study of the machining conditions of CBN tools in AISI M4 hardened to 64 HRC, which is applied to dies in the packaging sector, applying the methodology of Design of Experiments (DOE). The DOE makes more efficient evaluation of the results of experiments and its methodology can be replicated for different variables facilitating the comparison of this work. We analyzed the surface finish of the piece as the main output and adopted a roughness $R_a > 0.2\mu\text{m}$ as a criterion for end of life of the cutting tool. All parameters contributing to the cutting surface roughness and roundness, while the variation of feed rate showed significant influence on the finished part.

Key words

Turning hardened steel, CBN tools, AISI M4 steel, surface roughness.

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática dos movimentos de corte no processo de torneamento (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2008).....	5
Figura 2 - Força de corte para aresta de corte com $V_c = 200$ m/min, $f = 15$ mm/v e $ap = 0,15$ mm (Denkena, 2012)	7
Figura 3 - Ilustração esquemática do raio da aresta de corte (Denkena, 2012).....	8
Figura 4 - Representação das variáveis principais do processo de torneamento; (Sandvik, 2012).....	8
Figura 5 - Efeito da velocidade de corte (V_c) nas forças de corte para $ap = 0,2$ mm e $f = 0,08$ mm/v; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)	9
Figura 6 - Efeito do avanço de corte (f) nas forças de corte para $V_c = 120$ m/min e $ap = 0,2$ mm; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)	9
Figura 7 - Efeito da profundidade de corte (ap) nas forças de corte para $V_c = 120$ m/min e $f = 0,08$ mm/v; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)	10
Figura 8 – Desgaste (V_b) na ferramenta de CBN no torneamento com corte interrompido; (Chou, 2003).....	12
Figura 9 – Efeito da frequência do corte interrompido nas ferramentas de CBN no torneamento duro; (Chou, 2003)	12
Figura 10 - Gráfico representando as principais variáveis de corte e seus efeitos na força radial; F_a (N). (Fnides, Yallese, Mabrouki, & Rigal, 2011)	13
Figura 11 - Gráfico representando as principais variáveis de corte e seus efeitos na força tangencial; F_t (N). (Fnides, Yallese, Mabrouki, & Rigal, 2011)	14
Figura 12 - Diagrama de Dureza-Tenacidade dos materiais de ferramenta de corte (Sandvik, 2012).....	15
Figura 13 - Desgaste de flanco(a) e desgaste de entalhe (b) e (c); (Sandvik, 2012)	18
Figura 14 - Desgaste de cratera; (Sandvik, 2012)	19
Figura 15 - Vida da ferramenta para diferentes velocidades de corte (V_c); (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009).....	20
Figura 16 - Desgaste (V_b) a partir da comparação entre diferentes velocidades de corte (V_c) e o tempo de usinagem; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009).....	20
Figura 17 - Desgaste de cratera (V_k) a partir da comparação entre diferentes velocidades de corte (V_c) e o tempo de usinagem; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009) ..	21

Figura 18 – Análise do perfil da ferramenta de CBN após usinagem dura; (Remadna & Rigal, 2006).....	21
Figura 19 - Evolução do desgaste da ferramenta na usinagem a seco (Pereira, 2006).....	22
Figura 20 - Detalhe do desgaste da ferramenta na usinagem a seco (Huang, Chou, & Liang, 2007).....	23
Figura 21 - Análise visual das ferramentas “T” aplicadas a $V_c = 100\text{m/min}$ e $f = 0,02\text{mm/v}$ com fluído de corte (Vogl, 2007)	24
Figura 22 - Perfil teórico de rugosidade (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2008).....	25
Figura 23 - Histograma da rugosidade superficial para diferentes especificações de dureza e mesmos parâmetros de usinagem (Chen, 2000)	25
Figura 24 - Desenho esquemático da deformação plástica resultante do esforço de corte; (Chen, 2000)	26
Figura 25 - Rugosidade superficial em comparação a três diferentes raios de ferramenta, $V_c = 85\text{ m/min}$, $ap = 0,1\text{mm}$; (Chen, 2000)	26
Figura 26 - Superfície de resposta gerada pelo DOE para variável R_a ; (Júnior, 2010)	27
Figura 27 - Rugosidade (R_a) em função do comprimento de corte; (Vogl, 2007).....	27
Figura 28 - Perfil de rugosidade (R_a) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 60\text{m/min}$ e $f = 0,05\text{mm/v}$. (Rosário, 2011).....	28
Figura 29 - Perfil de rugosidade (R_a) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 60\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$. (Rosário, 2011).....	29
Figura 30 - Perfil de rugosidade (R_a) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 120\text{m/min}$ e $f = 0,05\text{mm/v}$. (Rosário, 2011).....	29
Figura 31 - Perfil de rugosidade (R_a) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 120\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$. (Rosário, 2011).....	29
Figura 32 - Perfil de rugosidade (R_a) na superfície do corpo de prova na condição retificação com $V_c = 54\text{m/s}$ e $f = 4\text{m/min}$ e $ap = 0,03\text{mm}$. (Rosário, 2011).....	30
Figura 33 - Efeito da velocidade de corte (V_c) na rugosidade (R_a , R_t e R_z) para $ap = 0,2\text{mm}$ e $f = 0,08\text{mm/v}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009).....	31
Figura 34 - Efeito da profundidade de corte (ap) na rugosidade (R_a , R_t e R_z) para $V_c = 90\text{m/min}$ e $f = 0,08\text{mm/v}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)	31
Figura 35 - Efeito do avanço de corte (f) na rugosidade (R_a , R_t e R_z) para $V_c = 90\text{m/min}$ e $ap = 0,2\text{mm}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)	32
Figura 36 - distribuição da temperatura a partir do fluxo de calor na usinagem pelo processo de torneamento: escala 3:1 (a) e 20:1 (b); (Santos, 2008).....	33

Figura 37 - Detalhe do calor gerado na ferramenta no processo de torneamento: escala 60:1 (Santos, 2008).....	34
Figura 38 - Gráfico dos resultados de rugosidade (R_a) em função da profundidade de corte e avanço; (Gonçalves, 2009)	34
Figura 39 - Fluxograma da pesquisa científica e projeto de experimentos. (Köche, 2012)	35
Figura 40 - Superfície 3D gerada a partir da variação dos parâmetros de velocidade de corte e avanço em relação a temperatura da ferramenta (Abhang, 2012)	38
Figura 41 – Torno CNC de precisão marca Romi modelo GL240 utilizado para usinagem do material endurecido.	40
Figura 42 - Sequencia de tratamento térmico do aço AISI M4; (Bohler, 2011)	41
Figura 43 - Dimensões dos corpos de prova do aço AISI M4 com dureza 64 HRc.....	42
Figura 44 - Geometria ISO TNGA 160408 do inserto de CBN	43
Figura 45 – Rugosímetro Portátil M300C integrado a impressora marca Mahr.	45
Figura 46 – Microscópio Olympus 40x.....	45
Figura 47 – Circularímetro marca Taylor Hobson modelo Talyrond 131.....	46
Figura 48 – Durômetro de bancada analógico marca Mitutoyo modelo Durotwin Plus.....	47
Figura 49- Média da rugosidade para a superfície usinada, medidas após primeiro ciclo de usinagem para cada parâmetro.	50
Figura 50 - Interações entre as variáveis de entrada e a rugosidade media.....	50
Figura 51 - Resultados dos novos ensaios considerando uma réplica.....	51
Figura 52 - Nova interação entre as variáveis de entrada e a rugosidade media.....	51
Figura 53 – Superfície de resposta para a Rugosidade (R_a) com relação à variação de velocidade de corte (V_c) e avanço (f).....	52
Figura 54 - Variação da rugosidade superficial em função da velocidade de corte	53
Figura 55 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 64\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$	54
Figura 56 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 80\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$	55
Figura 57 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$	55
Figura 58 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para avanço (f) de $0,01\text{mm/v}$	56

Figura 59 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 64\text{m/min}$ e $f = 0,03\text{mm/v}$	57
Figura 60 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 80\text{m/min}$ e $f = 0,03\text{mm/v}$	57
Figura 61 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,03\text{mm/v}$	58
Figura 62 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para avanço de $0,03\text{mm/v}$	58
Figura 63 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 64\text{m/min}$ e $f = 0,06\text{mm/v}$	59
Figura 64 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 80\text{m/min}$ e $f = 0,06\text{mm/v}$	59
Figura 65 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,06\text{mm/v}$	60
Figura 66 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para avanço de $0,06\text{mm/v}$	60
Figura 67 – Circularidade final para $V_c = 96\text{ m/min}$ e $f = 0,01\text{ mm/v}$	62
Figura 68 – Circularidade de saída média para cada um dos ensaios e parâmetros de corte ..	62
Figura 69 – Influência dos parâmetros na circularidade média para cada um dos ensaios e parâmetros de corte.....	63
Figura 70 – Superfície de resposta para a Circularidade (C) e influência dos parâmetros da velocidade de corte (V_c) e avanço (f).....	64
Figura 71 - Desgastes na ferramenta após o corpo de prova atingir rugosidade $R_a > 0,20\mu\text{m}$, para $V_c = 80\text{ m/min}$, $f = 0,03\text{ mm/v}$ e $a_p = 0,05\text{ mm}$	65
Figura 72 – Detalhe do desgaste de flanco da ferramenta	65
Figura 73 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem sem lubrificação para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$	67
Figura 74 – Comparação entre a rugosidade para os parâmetros de usinagem $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$ ao longo da usinagem com e sem lubrificação	67
Figura 75 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem sem lubrificação para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$	68
Figura 76 – Comparação entre a circularidade para os parâmetros de usinagem $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$ ao longo da usinagem com e sem lubrificação	69
Figura 77 – Desgastes na ferramenta para o teste sem lubrificação e parâmetros de corte de $V_c = 96\text{ m/min}$, $f = 0,01\text{ mm/v}$ e $a_p = 0,05\text{ mm}$	69

Figura 78 - Desgastes da ferramenta COM Lubrificação para $V_c = 96$ m/min, $f = 0,01$ mm/v e $a_p = 0,05$ mm.	70
Figura 79 - Desgastes da ferramenta SEM Lubrificação para $V_c = 96$ m/min, $f = 0,01$ mm/v e $a_p = 0,05$ mm.	70

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades Físicas do CBN; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009).....	16
Tabela 2 - Composição química do aço AISI M4; (Bohler, 2011).....	41
Tabela 3 - Parâmetros de usinagem utilizados	44
Tabela 4 - Fatorial para os parâmetros de usinagem;	44
Tabela 5 – Resposta de saída para a rugosidade superficial R_a (μm).	48
Tabela 6 - Resposta para a circularidade da superfície usinada (μm).	61
Tabela 7 - Resposta para a rugosidade R_a na usinagem sem lubrificação.	66
Tabela 8 - Resposta para a circularidade C na usinagem sem lubrificação.....	68

Capítulo 1

1. Introdução

A usinagem de materiais endurecidos tornou-se uma alternativa da indústria metal mecânica para reduzir custos e atender a especificações cada vez mais exigentes no tocante a sua complexidade e acabamento superficial. A produção de peças em série facilita o investimento de tempo e dinheiro no desenvolvimento de métodos mais adequados e que possam aumentar a eficiência de produção.

A indústria moderna exige equipamentos e processos que permitam a fabricação de produtos com precisão cada vez maior, geometria complexa e com elevada qualidade; (Denkena, 2012). Sendo assim, o desafio está na manutenção de um conceito de inovação que permita aumentar a eficiência de produção diante de uma produção por lotes, ou ainda, aumentar a flexibilidade das empresas na produção de peças com perfil e acabamento exigentes, muitas vezes em baixo volume, como o que pode ser observado no segmento de matrizes para conformação de embalagens a frio. Para estas aplicações, a qualidade do material base, forma dimensional e acabamento superficial podem representar um diferencial competitivo enorme diante da concorrência. Tais respostas são hoje obtidas com facilidade pelo processo de retifica, no entanto, com muito mais energia e recursos de tempo e mão-de-obra, do que o apresentado como proposta neste trabalho.

O processo de torneamento de materiais endurecidos vem sendo encarado como uma solução de menor custo a estas demandas do mercado e vem se tornando uma opção eficiente quando comparada ao processo de retificação convencional.

O presente trabalho tem por objetivo principal estudar o efeito da rugosidade e circularidade superficial pela influência dos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte e avanço, no processo de torneamento do aço AISI M4 endurecido a 64 HRC. Para esta usinagem foram escolhidos os insertos de CBN, devido à sua elevada dureza e resistência ao desgaste. Resultados similares em materiais de dureza elevada são observados na literatura e podem ser comparados a retífica convencional. Alguns estudos apontam para rugosidades abaixo de 0,6 μ m com o uso de ferramentas de CBN; (Diniz & Matsumoto, 1999). Rugosidades entre 0,2 a 0,3 μ m também foram obtidos em tornos de alta precisão (Sales, 2004), o que traz inúmeras vantagens ao processo de produção, como a possibilidade de eliminar etapas de fabricação, aumentar o volume de produção e reduzir o custo operacional, no entanto, é sabido que para uma alta qualidade e produtividade no processo de torneamento duro, a acurácia da ferramenta é essencial; (Souza, Nono, Ribeiro, Machado, & Silva, 2008)

Neste contexto, o estudo da vida da ferramenta e a rugosidade média das superfícies usinadas pelo processo de torneamento são influenciados por vários fatores, como por exemplo, a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de usinagem o tipo de ferramenta. Sendo assim, a metodologia de projetos de experimento foi aplicada a este projeto e permite estabelecer uma relação entre os parâmetros de corte e a rugosidade final da superfície ao longo dos passes de usinagem, levando-se em consideração a variação simultânea dos fatores para a resposta de interesse.

A aplicação de um método estatístico na avaliação das variáveis de entrada e saída de um processo de experimentação representa uma tendência de que o resultado seja mais robusto às variações decorrentes do próprio processo de fabricação, meio ambiente e usuário; (Pereira, 2006). Sendo assim propõe-se também, como objetivo secundário do presente trabalho, avaliar o comportamento da ferramenta de CBN nesta usinagem.

Este trabalho está estruturado em seis diferentes capítulos, os quais estão descritos a seguir:

- Capítulo I: Introdução
- Capítulo II: Revisão Bibliográfica

É apresentada neste capítulo uma breve revisão da literatura recente sobre a usinagem dos aços endurecidos, ferramentas disponíveis no mercado. Revisa-se também neste capítulo a

metodologia empregada no projeto de experimentos, evidenciando-se as vantagens obtidas com a utilização desta técnica escolhida para delinear este trabalho.

- **Capítulo III: Experimentação**

Neste capítulo serão descritos no detalhe os métodos utilizados neste trabalho, as ferramentas de corte, o material utilizado para a usinagem, características da máquina, instrumentos, corpos de prova, condições de corte e procedimentos utilizados para execução da usinagem dura.

- **Capítulo IV: Resultados e Discussão**

Este capítulo apresenta a discussão e análise dos dados obtidos pelo capítulo anterior, bem como o resgate de assuntos relacionados na revisão bibliográfica com o objetivo de evidenciar possíveis analogias ou novas respostas de saídas obtidas pela experimentação.

- **Capítulo V: Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros**

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas pelo trabalho e possíveis oportunidades de estudos futuros.

- **Capítulo VI: Referências Bibliográficas.**

Capítulo 2

2. Revisão da Literatura

O torneamento de materiais endurecidos vem sendo cada vez mais utilizado em substituição ao processo de retífica cilíndrica, principalmente pelo desenvolvimento cada vez maior de ferramentas mais eficientes e equipamentos mais rígidos. Tradicionalmente, máquinas e equipamentos modernos respondem bem a demanda do mercado por produtos de alta precisão e qualidade usando ferramentas e parâmetros de corte bem definidos, no entanto, também se sabe que no processo de torneamento duro a magnitude e inter-relação entre estes parâmetros de usinagem podem influenciar significativamente os resultados finais da peça usinada. Neste capítulo é apresentada a metodologia de usinagem de aços endurecidos para o processo de torneamento, entender as características das ferramentas indicadas a estas operações e a relação entre os parâmetros de corte aplicados. Apresentam-se também uma análise dos trabalhos de usinagem dura disponíveis na literatura.

2.1 Processo de torneamento

Tradicionalmente, a torneamento se caracteriza pela aplicação de um material bruto a ação de uma ou mais ferramentas em uma máquina para ser usinado. Este processo é utilizado na fabricação de diversos componentes com o objetivo de atender a demanda de diversos setores da indústria metal-mecânica. Sendo assim, a exigência por peças cada vez mais

complexas, com tolerâncias dimensionais menores e boa qualidade superficial, tem tornado estes processos cada vez mais preciso.

O torneamento é a combinação de dois movimentos: rotação da peça e movimento de avanço da ferramenta e em algumas aplicações, a peça pode ser estacionária, com ferramenta girando ao seu redor para remoção de material.

Atualmente, observam-se estudos com foco no controle de variáveis que influenciam o torneamento, tais como, deformação plástica, desgaste, vibração, parâmetros de corte, formação de cavacos (Nascimento, 2011), entre outros, todos envolvidos no processo de usinagem.

O torneamento tradicional é usado para a fabricação de peças cilíndricas de corte contínuo ou interrompido em diferentes tipos de materiais. O corte se dá por meio da rotação da peça em seu próprio eixo fixada na máquina, o qual, em contato com a ferramenta, lhe dá forma e dimensão desejadas e como se sabe os parâmetros de corte é responsável pelos movimentos ativos que promovem a remoção do material ao ocorrerem (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2008).

A Figura 1 mostra a geometria básica do processo de torneamento, onde se observam os parâmetros do processo, são eles: profundidade de corte (a_p) avanço (f) e velocidade de corte (V_c).

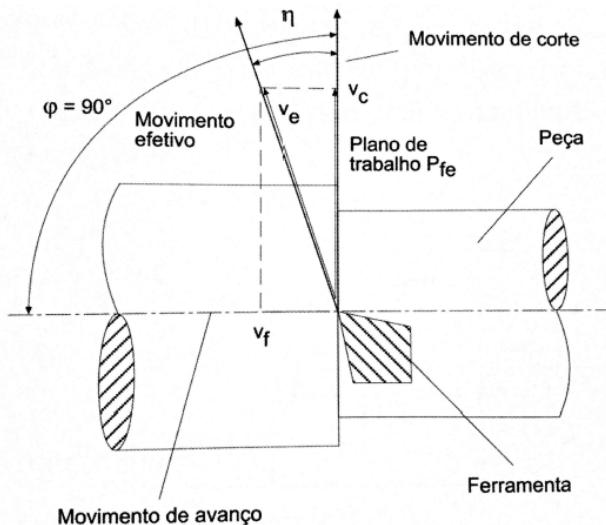


Figura 1 – Representação esquemática dos movimentos de corte no processo de torneamento (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2008)

As forças de corte podem ser divididas em três componentes principais: força de avanço (F_a), força radial (F_r) e força tangencial (F_t). A força tangencial é a maior dos três componentes, apesar da força radial também se apresentar usualmente grande; (Chen, 2000). Estas forças são resultado de geometria da ferramenta e parâmetros de corte e todas podem ser simulados com o apoio de um programa de Elementos Finitos (FEM); (Cervelin, 2009).

O material a ser usinado, tal quais suas características físicas por sua vez, influenciam diretamente na escolha das ferramentas, parâmetros e processo de usinagem, principalmente quando a aplicação exige acabamentos e geometrias complexas e de elevada qualidade. A dureza da peça influência diretamente no resultado do acabamento superficial da usinagem e a variação das velocidades de corte podem aumentar significativamente a qualidade do resultado de torneamento; (Chavoshi & Tajdari, 2010).

O torneamento é um processo extremamente complexo e como mencionado, possui diversas variáveis envolvidas que podem afetar diretamente seu resultado. O estudo das relações entre estas variáveis permite determinar as melhores condições de corte que, por sua vez, trarão os melhores resultados. Muitos trabalhos apresentam as interações entre as ferramentas e a peça usinada, bem como seus parâmetros de corte e características que afetam a qualidade do produto; (Dória, 2005) e (Malère, 2006).

No que tange a rugosidade superficial, os parâmetros de corte podem ser considerados como os responsáveis pela integridade e qualidade final; (Lima, 2008). Sendo assim, além dos parâmetros, no processo de torneamento, as ferramentas de corte merecem atenção especial e sua escolha adequada pode significar o sucesso ou não da usinagem.

Normalmente, o processo de seleção de uma ferramenta de corte, pode passar pela análise econômica ou técnica. Na maioria das situações, ambas as análises devem ser consideradas para a decisão final. Neste contexto, é importante que se tenha conhecimento dos critérios de desgaste e vida útil destas ferramentas, visto que o canto vivo destes componentes é comumente vulnerável a desgastes e lascas que reduzem significativamente a sua eficiência e influenciam na rugosidade superficial do produto final; (Denkena, 2012).

Entender estes mecanismos permite aperfeiçoar o uso de recursos na indústria e, inclusive, atuar como um agente de inovação diante das necessidades e cobrança do mercado atual.

2.2 Condições de corte

Dentre as variáveis importantes para controle no processo de torneamento, os parâmetros de corte se destacam pela interação e influência no resultado final de acabamento superficial e qualidade dimensional das peças usinadas, principalmente pelo fato de que o processo de corte é resultado de uma interação física entre a aresta de corte da ferramenta e a peça de trabalho.

Antes de estudar estas interações dos parâmetros de corte e a influência das diferentes geometrias disponíveis para as ferramentas, é importante entender como estas variáveis interferem nas forças de corte.

A Figura 2 mostra a simulação da força de corte gerada a partir do torneamento de um aço AISI 1045 com ferramenta de metal duro SNMA 120408 sem óleo refrigerante.

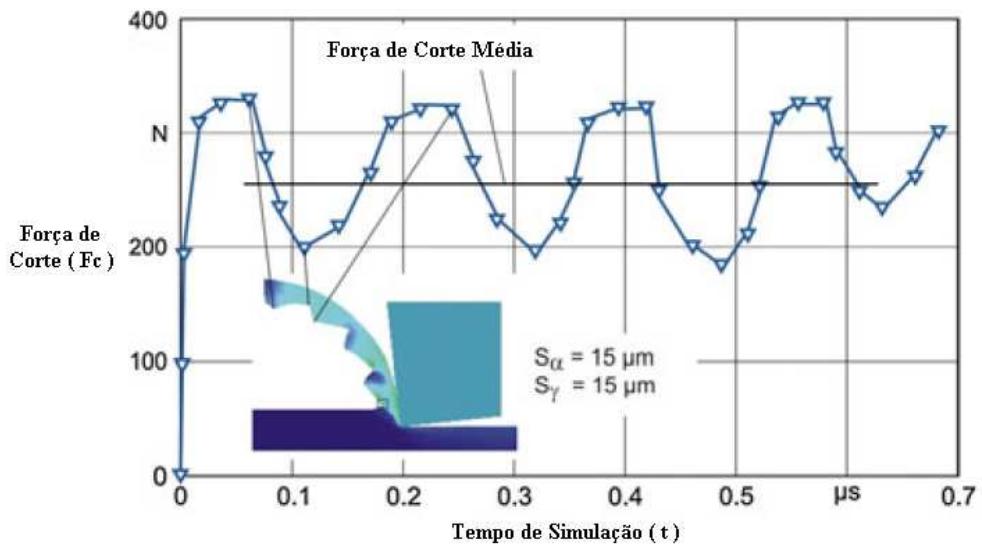


Figura 2 - Força de corte para aresta de corte com $V_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 15 \text{ mm/v}$ e $ap = 0,15 \text{ mm}$ (Denkena, 2012)

O tamanho e forma da geometria da aresta de corte podem ser caracterizados pelos parâmetros S_α , S_γ e Δr , conforme demonstra a Figura 3. A magnitude e detalhes destes parâmetros podem influenciar suas inter-relações e gerar resultados também compatíveis; (Denkena, 2012).



Figura 3 - Ilustração esquemática do raio da aresta de corte (Denkena, 2012)

Como já visto anteriormente, as variáveis de controle do processo de torneamento são: velocidade de corte (V_c), avanço da ferramenta (f) e profundidade de corte (a_p). Tais variáveis interferem diretamente na usinagem, no acabamento superficial e no custo de operação; (Denkena, 2012).

A Figura 4 representa de forma esquemática as interações destas variáveis com a peça durante o processo de torneamento.

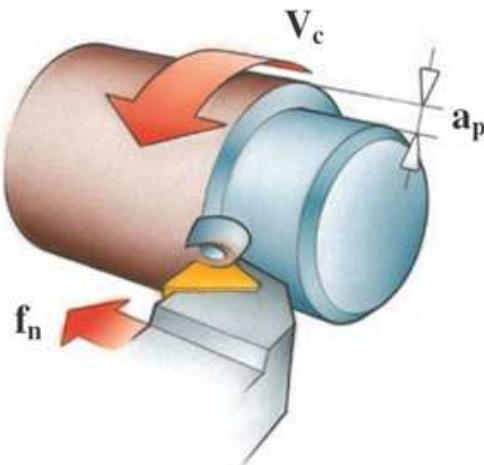


Figura 4 - Representação das variáveis principais do processo de torneamento; (Sandvik, 2012).

No processo de torneamento endurecido, a peça e ferramenta estão sujeitas a severas condições de fricção, portanto, a definição correta dos parâmetros de corte pode determinar a força de corte na usinagem.

Uma avaliação desta interação é apresentada pelo autor (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009) no torneamento do aço para rolamento 100-Cr6 com ferramenta de CBN-L e apresentadas nas Figuras 5, 6 e 7.

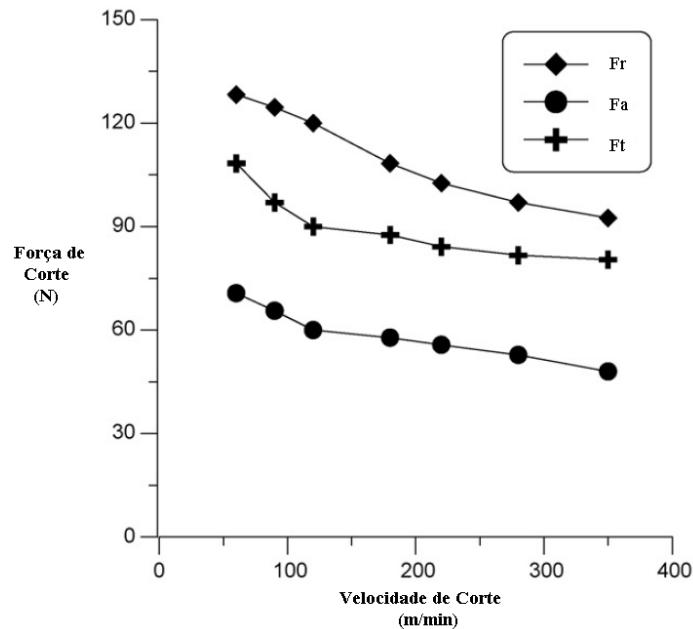


Figura 5 - Efeito da velocidade de corte (V_c) nas forças de corte para $ap = 0,2\text{mm}$ e $f = 0,08\text{mm/v}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

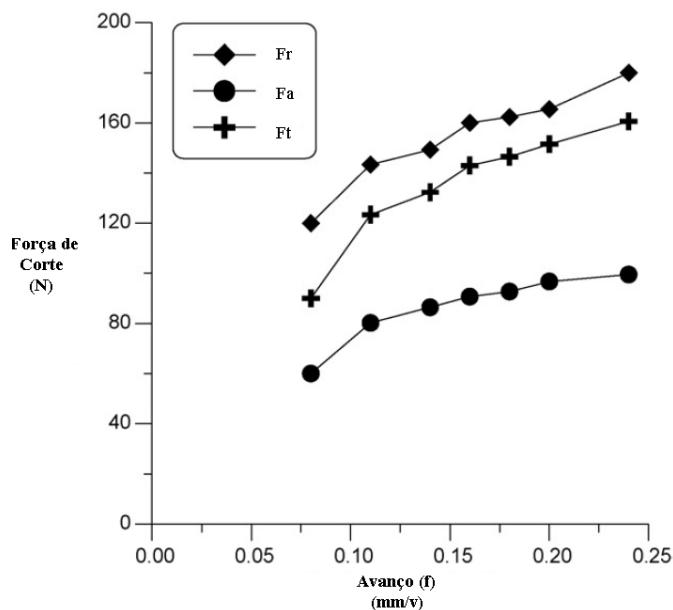


Figura 6 - Efeito do avanço de corte (f) nas forças de corte para $V_c = 120\text{m/min}$ e $ap = 0,2\text{mm}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

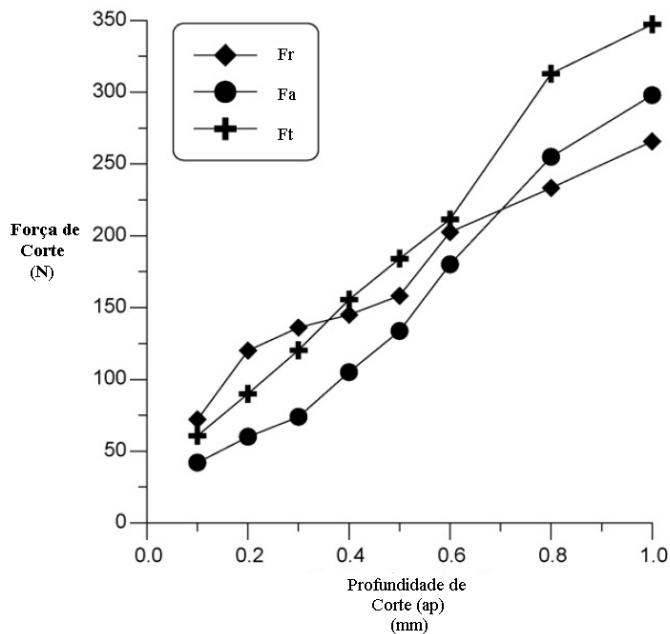


Figura 7 - Efeito da profundidade de corte (ap) nas forças de corte para $V_c = 120\text{m/min}$ e $f = 0,08\text{mm/v}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

2.3 Torneamento de aços endurecidos

A usinagem de aços endurecidos acima de 45 HRC usando ferramentas de corte pelo processo de torneamento tem sido desenvolvida para substituir o processo de retificação cilíndrica, o qual, tem se mostrado mais lento e inflexível. O torneamento duro oferece uma vantagem muito grande de benefícios quando comparado ao tradicional processo de retífica; (Dogra, Sharma, Sachdeva, Suri, & Dureja, 2010). Existe uma demanda muito grande pela usinagem de aços endurecidos na fabricação de rolamentos, eixos de engrenagem, ferramentas de corte especiais, matrizes, moldes, etc., com o objetivo de melhorar a força e resistência ao desgaste destes componentes, no entanto, vale salientar que o torneamento duro exige valores maiores de tensão de usinagem do que na retífica convencional; (Farias, 2009).

Neste contexto, a utilização de ferramentas com revestimento de Nitreto de Titânio (TiN) apresentam melhores resistência a tensão de usinagem; (Outeiro, Pina, M'Saoubi, Pusavec, & Jawahir, 2008). O revestimento superficial possui apenas alguns milésimos de

espessura, podendo variar entre $0,5\mu\text{m}$ e $4,0\mu\text{m}$, mas são mais duros que o metal duro e extremamente resistente ao desgaste chegando a durezas de 2.300HV; (Balzers, 2012).

Existem diferentes exemplos do uso do torneamento de materiais endurecidos na fabricação de matrizes, punções, moldes ou peças de manutenção. Este tipo de aplicação requer a fabricação de diferentes geometrias em baixa escala com diferentes ferramentas. (Oliveira, Diniz, & Ursolino, 2009). Ainda segundo os autores, o emprego do torneamento duro permite reduzir custos e aumentar o desempenho de fabricação.

São muitas as razões para escolha do torneamento duro em substituição ao processo de retífica cilíndrica; (Pereira, 2006), dentre as quais se podem citar:

- possibilidade de eliminar etapas de fabricação;
- maior produtividade;
- máquina-ferramenta mais simples e de menor custo;
- possibilidade de operações múltiplas em uma só fixação da peça;
- flexibilidade de processo;
- menor custo das ferramentas de corte.

Estas vantagens passaram a ser observadas pela indústria a partir do desenvolvimento de materiais de corte mais adequados, como por exemplo, ferramentas de cerâmicas mistas e os nitretos cúbicos de boro, além do advento de máquinas mais rígidas e avançadas; (Pereira, 2006).

O desafio, no entanto, está na escolha adequada das ferramentas e parâmetros de corte, tanto para usinagem contínua ou interrompida.

Durante o processo de usinagem é criada interações complexas entre o material e a ferramenta de corte gerando altas temperaturas e forças que causam desgaste e quebra da ferramenta. Estas condições podem reduzir a precisão do corte e modificar as características mecânicas da peça causando inconvenientes ao processo; (Lipatov, 2008).

Quando o torneamento duro é realizado em peças que possuem corte interrompido, estes desgastes se agravam e podem gerar uma redução no tempo de vida útil das ferramentas. A Figura 8 apresenta um gráfico de desgaste de flanco (Vb) da ferramenta CBN em função do tempo de usinagem na usinagem do aço PM M50 endurecido a 63 HRC. A aplicação de

diferentes velocidades de corte (V_c) e diferentes classes de insertos de CBN retornam curvas diferentes quanto à vida útil da ferramenta.

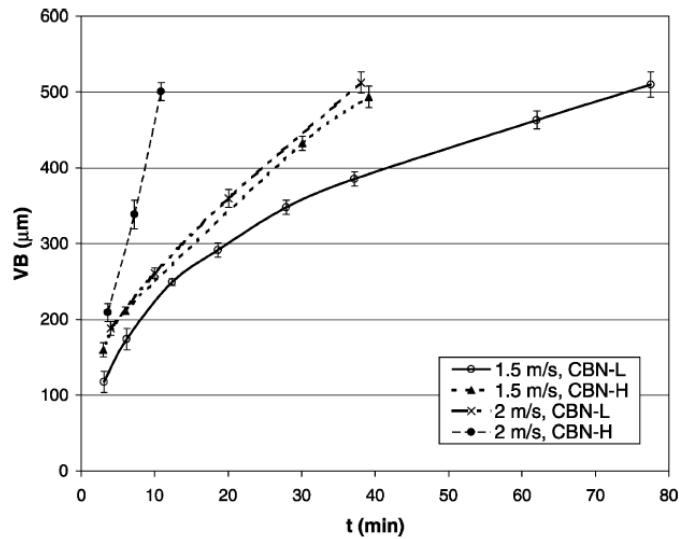


Figura 8 – Desgaste (Vb) na ferramenta de CBN no torneamento com corte interrompido; (Chou, 2003)

Na Figura 8, o desgaste (Vb) é maior com o uso da velocidade de corte (V_c) de 2m/s, quando comparada a 1,5m/s o que significa que o desgaste é proporcional a frequência do corte interrompido; (Chou, 2003).

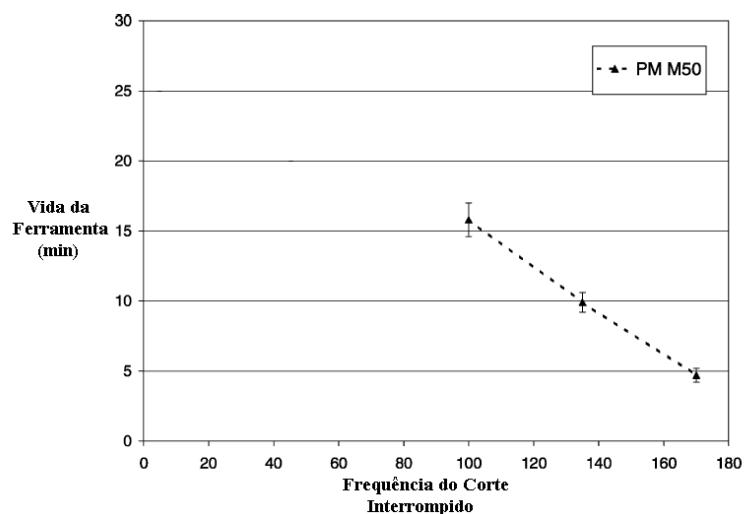


Figura 9 – Efeito da frequência do corte interrompido nas ferramentas de CBN no torneamento duro; (Chou, 2003)

Esta afirmação pode ser mais bem avaliada por meio da análise da Figura 9. É apresentado um menor tempo de vida da ferramenta em função da frequência do corte interrompido.

Sendo assim, no torneamento duro, a qualidade da peça quanto à rugosidade superficial e a acurácia dimensional, se tornam uma importante variável do desempenho da usinagem e são influenciados pelas condições de corte, material e geometria das ferramentas, formação de cavaco, vibração e aplicação de óleo refrigerante. Alguns autores afirmam que o uso de lubrificantes permite uma redução significativa da rugosidade superficial da peça torneada, seja ele no estado líquido ou sólido; (Dilbag & Rao, 2008).

Alguns estudos foram desenvolvidos para verificar a influência dos parâmetros usinagem na força de corte durante o processo de torneamento do aço AISI H11 endurecido a 50 HRC com ferramentas de cerâmica CC650 (70% Al_2O_3 + 30% TiC); (Fnides, Yallese, Mabrouki, & Rigal, 2011).

A Figura 10 mostra a amplitude dos parâmetros em relação à força radial de usinagem. Observa-se que a profundidade de corte (a_p) é o parâmetro que mais exerce influência sobre a força radial, seguidos pelo avanço (f) e por fim a velocidade de corte (V_c) com influência mais baixa.

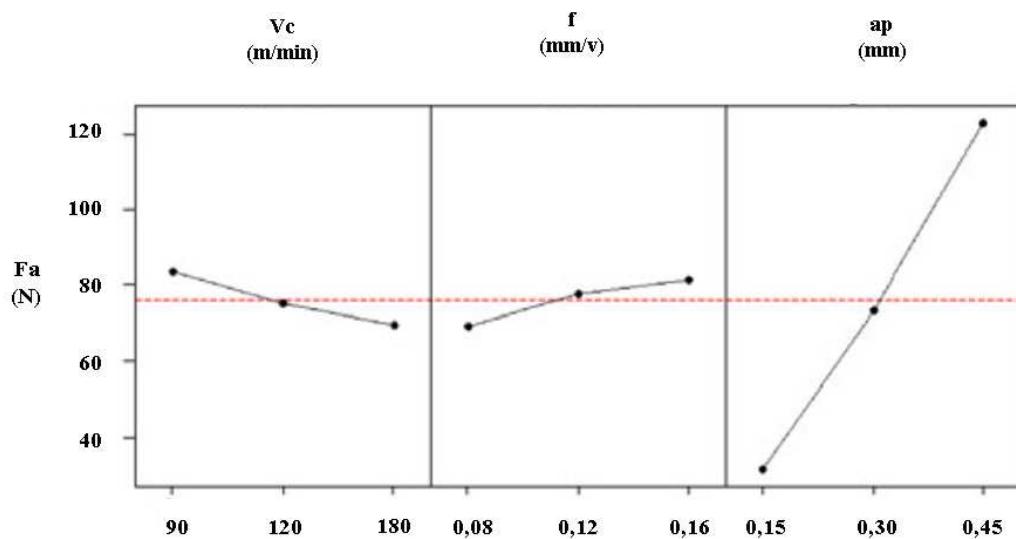


Figura 10 - Gráfico representando as principais variáveis de corte e seus efeitos na força radial; Fa (N). (Fnides, Yallese, Mabrouki, & Rigal, 2011)

A Figura 11 mostra que a velocidade de corte (V_c) apresenta um declínio linear em relação à força de corte tangencial (F_t), enquanto que o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) uma resposta linear de aumento de força.

Tal qual para a força radial, o parâmetro que mais exerce influência para o aumento da força tangencial (F_t) é a profundidade de corte (a_p), seguido pelo avanço (f).

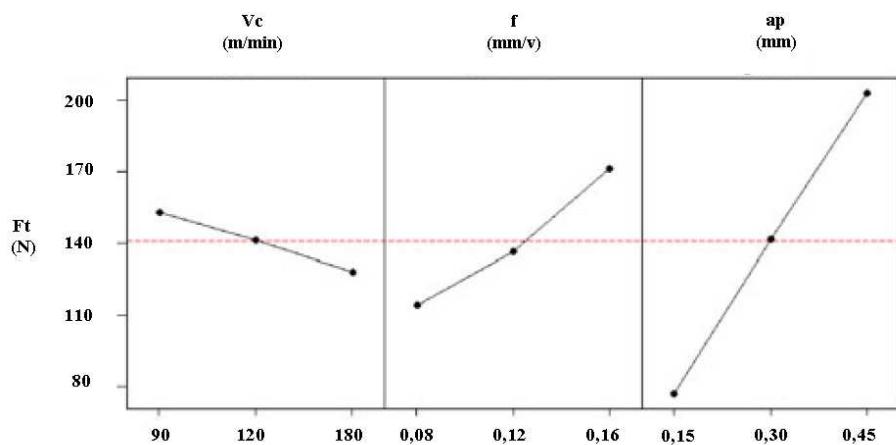


Figura 11 - Gráfico representando as principais variáveis de corte e seus efeitos na força tangencial; F_t (N). (Fnides, Yallese, Mabrouki, & Rigal, 2011)

2.4 Ferramentas de corte para o torneamento duro

Muitos são os fatores que afetam o rendimento e produção de peças pelo processo do torneamento duro e para garantir um elevado desempenho, muitos são os materiais aplicados às ferramentas de corte neste processo o que permite elevar propriedades de interesse como dureza, resistência à ruptura, tenacidade, resistência à compressão, resistência ao choque térmico e as reações químicas. Estas propriedades podem ser melhores ou piores, dependendo das condições em que a usinagem ocorre e também do tipo de material da ferramenta de corte.

Segundo a norma ABNT (NBR_6175, 1979) a ferramenta de usinagem mecânica é constituída de arestas cortantes, e destinada à remoção de cavaco. No caso da ferramenta possuir uma única superfície de saída, é chamado de ferramenta monocortante, quando possui mais de uma superfície de saída é chama de ferramenta multicortante. A geometria da

ferramenta de corte exerce influência significativa na usinagem dos metais, em especial, na zona de deformação da peça e distribuição de tensões e temperatura de corte; (Denkena, 2012).

Segundo (Sethi & Kumar, 2012) a interação entre os parâmetros de corte influenciam significativamente o desgaste das ferramentas no processo de torneamento duro. Alguns dos mais importantes materiais aplicados às ferramentas de usinagem são descritos na literatura; (Pereira, 2006). Uma rápida referência a estes materiais:

- aços rápidos;
- aços rápidos com cobertura;
- metal duro;
- metal duro com cobertura;
- material cerâmico;
- nitreto de boro cúbico (CBN);
- diamante.

Em geral, quando se aumenta na ferramenta a dureza a quente e a resistência ao desgaste por abrasão, diminui-se a tenacidade do material conforme Figura 12. Isto significa que o rendimento e desempenho esperado está diretamente relacionado a correta escolha da ferramenta, incluso principalmente seu material e composição química.

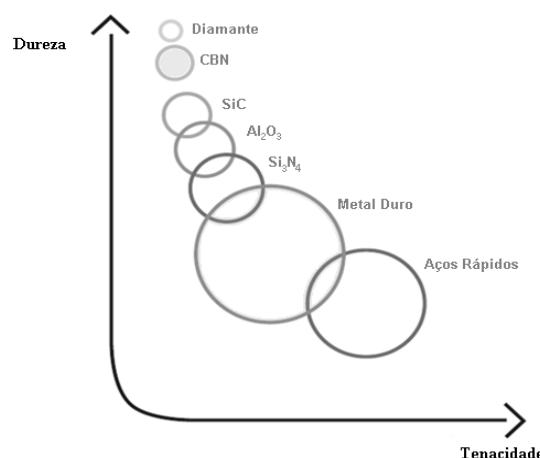


Figura 12 - Diagrama de Dureza-Tenacidade dos materiais de ferramenta de corte (Sandvik, 2012)

Na usinagem de materiais endurecidos, o aumento da temperatura causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, além de gerar o desgaste da ferramenta por abrasão, também acelera a ocorrência de outros fenômenos de desgaste entre a peça e a ferramenta, tais como a difusão e a oxidação. Sendo assim, alguns materiais são recomendados especificamente para aplicações em usinagem duras; (Stakhniv & Devin, 2011), dentre os quais se destacam os materiais cerâmicos e o nitreto cúbico de boro (CBN) para materiais ferrosos e o diamante policristalino (PCD), para materiais não ferrosos; (Valdéz, 2008)

Em geral os materiais cerâmicos com elevada dureza, em particular o nitreto cúbico de boro (CBN), tem sido empregado na usinagem de aços endurecidos com sucesso; (Pereira, 2006). Ferramentas de cerâmica oferecem uma alta produtividade devido à possibilidade de trabalho com altas velocidades de corte pela elevada resistência ao desgaste; (Bitterlich, Bitsch, & Friederich, 2008). Suas propriedades químicas típicas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades Físicas do CBN; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

Propriedades Físicas do CBN				
Material	Dureza HV	Tenacidade	Densidade	Tamanho do Grão
CBN	2800 N/mm ²	4,2 Mpa.m ^{1/2}	4,3 g/cm ³	2,5µm

São diversos os tipos de CBN disponíveis no mercado. Em geral, cada fabricante apresenta diferentes soluções em materiais, quantidades de aglomerantes e diferentes tamanhos e distribuição de partículas. O CBN é um composto produzido artificialmente por meio de altas temperaturas e alta pressão; (Diniz & Oliveira, 2008). De maneira geral podem ser divididos em duas categorias distintas, segundo suas características e aplicações; (Chou, Evans, & Brarash, 2002) como segue:

- CBN-H para usinagem de desbaste

O CBN-H possui maior concentração de nitreto cúbico de boro alto, entre 85 e 90% do volume, o que aumenta a ligação dos cristais e sua tenacidade. Também são

constituídos de grãos com tamanhos que variam entre 3 a 6 μ m. Por esta razão são utilizados com frequência nas operações de desbaste com profundidade de corte (a_p) entre 0,5 e 8mm. São recomendados em operações de torneamento onde existe corte interrompido pela maior tenacidade apresentada.

- CBN-L para usinagem de acabamento

O CBN-L possui menor concentração de nitreto cúbico de boro, entre 50 e 60% do volume, com menor tenacidade e maior dureza. Também são constituídos de grãos com tamanhos que variam entre 0,5 a 1 μ m e por este motivo utilizados com frequência nas operações de acabamento com profundidade de corte (a_p) abaixo de 0,5mm. Apresentam menor condutividade térmica, facilitando assim, a remoção do cavaco; (Chou, Evans, & Brarash, 2002). Aplicados principalmente em operações de usinagem onde há o corte contínuo de materiais.

O uso de ferramentas de CBN-H, ou seja, com alta concentração de nitreto cúbico de boro, garante a ferramenta uma maior tenacidade, como apresentado anteriormente. Tal característica física permite que a ferramenta tenha uma maior vida útil, por exemplo, durante um processo de corte interrompido; (Diniz, Gomes, & Braghini, 2005). A vida útil da ferramenta pode ser calculada por meio dos diferentes parâmetros de qualidade durante a usinagem, ou seja, rugosidade do produto final, circularidade, acurácia às tolerâncias dimensionais, entre outros. Alguns outros parâmetros relacionados ao inserto também tem sido observados ao longo do tempo. Dentre estes parâmetros, destacam-se o desgaste de flanco (V_b) e desgaste de cratera (V_k).

A usinagem de materiais endurecidos foi amplamente estudada no meio acadêmico e a evolução do desgaste (V_b) tem sido utilizado como parâmetro de comparação da eficiência das ferramentas de CBN. Dentre os principais problemas que determinam o fim de vida de uma ferramenta deste tipo, destacam-se o desgaste de flanco e de cratera para o CBN-H e o lascamento e quebra para a classe CBN-L; (Diniz, Gomes, & Braghini, 2005).

2.4.1 Avarias e desgastes de ferramentas de corte

Como já visto, a escolha adequada da ferramenta é importante para o sucesso do torneamento. Tal resultado pode ser resumido em produzir peças com qualidade que atendam os requisitos do cliente, no menor custo e no menor tempo possível, o que obviamente, também interfere no custo final do processo.

Os três principais tipos de desgaste de ferramentas são:

- Desgaste de flanco

É o desgaste mais comum observado no processo de torneamento e é causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça. Este tipo de desgaste provoca alterações grandes de rugosidade superficial na peça, bem como na tolerância dimensional e a circularidade da peça. O desgaste pode ser observado na Figura 13(a).

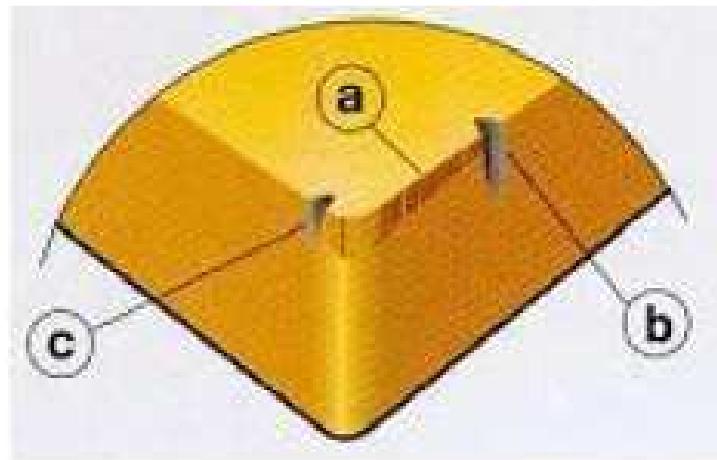


Figura 13 - Desgaste de flanco(a) e desgaste de entalhe (b) e (c); (Sandvik, 2012)

- Desgaste de cratera

Ocorre na superfície de saída da ferramenta e, tal qual o desgaste de flanco, também é gerado pelo atrito entre a ferramenta e a peça. Este tipo de desgaste pode

ocasionar a quebra da ferramenta em casos extremos e pode ser observado na Figura 14.

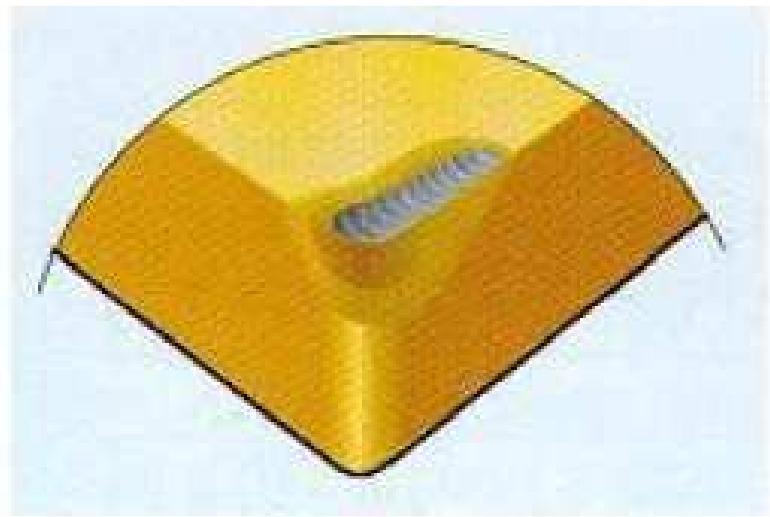


Figura 14 - Desgaste de cratera; (Sandvik, 2012)

- Desgaste de entalhe

O desgaste de entalhe ocorre normalmente com o desgaste de cratera e flanco e é caracterizado por sulcos profundos na superfície de saída da ferramenta conforme Figuras 13(b) e 13(c) são provocados comumente pelo desgaste de oxidação.

(Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009) apresenta um estudo de torneamento do aço 100Cr6 temperado a 60 HRC para aplicação em rolamentos utilizando ferramentas de CBN-L. O autor estuda as respostas de saída para as variáveis de velocidade de corte (90m/min e 180m/min), avanço (0,2mm e 0,6mm) e profundidade de corte (0,08mm/v e 0,2mm/v). Seus resultados apontam para uma redução do tempo da vida útil da ferramenta para velocidades de corte maiores, conforme Figura 15.

Para este ensaio realizado, existe uma relação entre o desgaste de flanco (V_b) e de cratera (V_k) da ferramenta em função da velocidade de corte (V_c) e o tempo de usinagem; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009), conforme Figuras 16 da 17.

Em especial nas ferramentas de CBN há uma tendência a fraturar súbita e isto tem limitado seu uso mais extenso, de modo que os insertos de cerâmica devem ser observado em termos de desgaste máximo de folga e saída; (Malère, 2006).

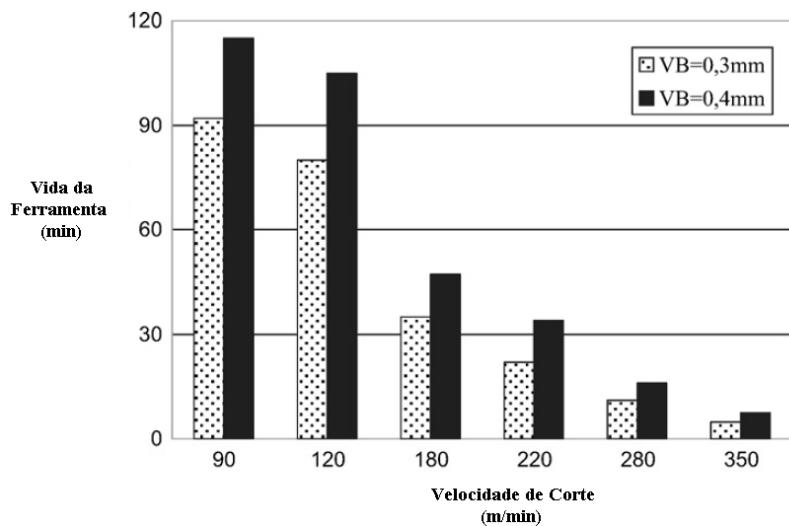


Figura 15 - Vida da ferramenta para diferentes velocidades de corte (Vc);
(Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigel, 2009)

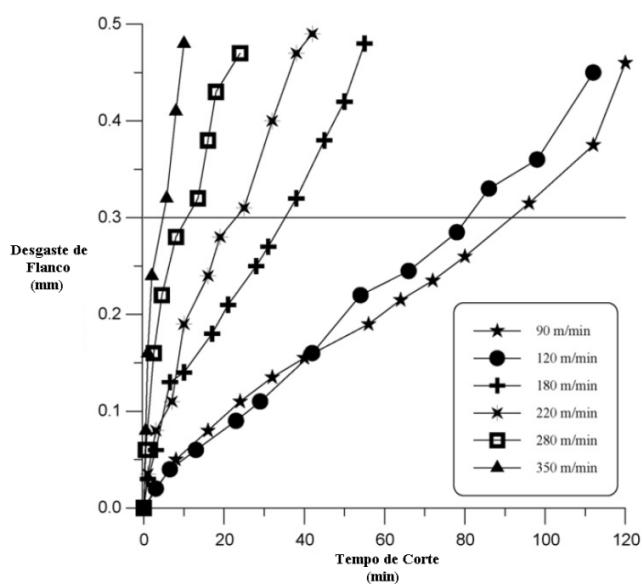


Figura 16 - Desgaste (Vb) a partir da comparação entre diferentes velocidades de corte (Vc) e o tempo de usinagem; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigel, 2009)

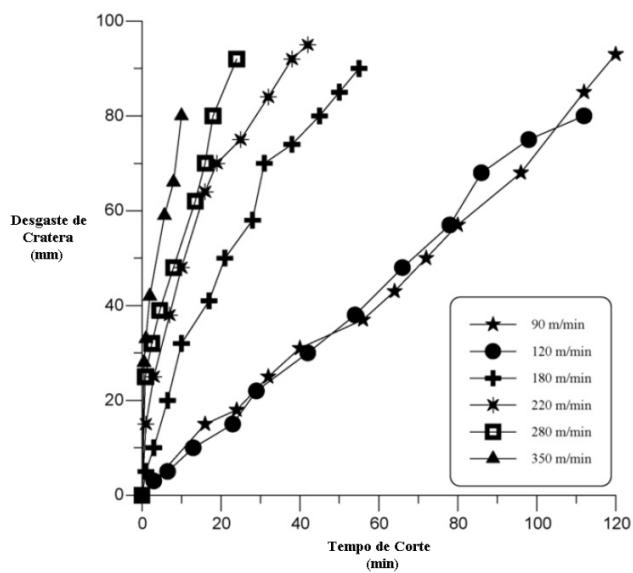


Figura 17 - Desgaste de cratera (V_k) a partir da comparação entre diferentes velocidades de corte (V_c) e o tempo de usinagem; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

A possibilidade de monitorar as variáveis do processo, como rugosidade, acurácia dimensional e principalmente as pressões de corte permitem fazer um diagnóstico do desgaste das ferramentas, visto que alterações destes parâmetros estão atreladas também as condições físicas da aresta de corte; (Thakur, Ramamoorthy, & Vijayaraghavan, 2009).

Alguns estudos apontam para a relação entre o desgaste do perfil e a distribuição das forças de corte, direção e tamanho, na usinagem dura; (Remadna & Rigal, 2006).

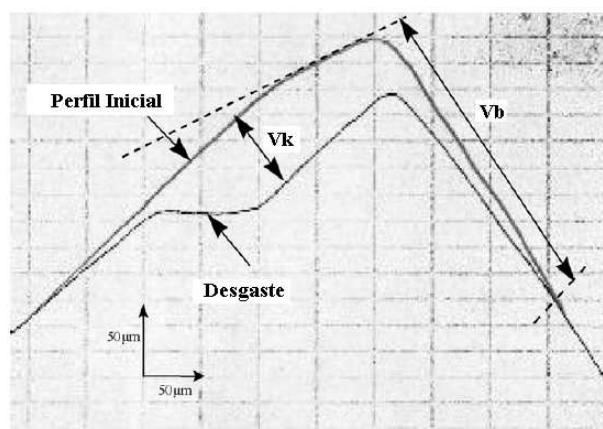


Figura 18 – Análise do perfil da ferramenta de CBN após usinagem dura; (Remadna & Rigal, 2006)

A Figura 18 apresenta o detalhe do desgaste de flanco (Vb) e desgaste de cratera (V_k) medida a partir do torneamento de um aço inoxidável (52 HRC) com a ferramenta de CBN código CNMA 12 04 08 T01020.

2.5 Torneamento a seco

Dentre as principais funções do fluido de corte nas operações de usinagem, pode-se citar a redução da geração de calor pela diminuição do atrito entre a ferramenta e o cavaco, a retirada de calor da peça e da ferramenta, bem como auxilia na remoção do cavaco para fora da região de corte; (Scandiffio, 2000), (Diniz & Micaroni, 2007) e (Momper, 2000).

(Pereira, 2006) faz a opção de estudar o torneamento duro sem lubrificação pelo fato de que nesta condição de corte a alta temperatura favorece a deformação e o cisalhamento do cavaco, reduzindo os esforços de corte.

(Valdéz, 2008) faz um estudo de substituição do processo de retificação na fabricação de componentes para rolamentos por meio da usinagem do aço DIN 100Cr6 a partir do uso de ferramentas de CBN.

Na Figura 19 se observa a variação de rugosidade superficial ao longo dos passes de usinagem para o aço ABNT 52100 endurecido para $V_c = 200\text{m/min}$, $f = 0,05\text{mm/v}$ e $ap = 0,15\text{mm}$. (Pereira, 2006) aplicou neste teste a seco o inserto de CBN de geometria ISO CNGA 12 04 08 S01525.

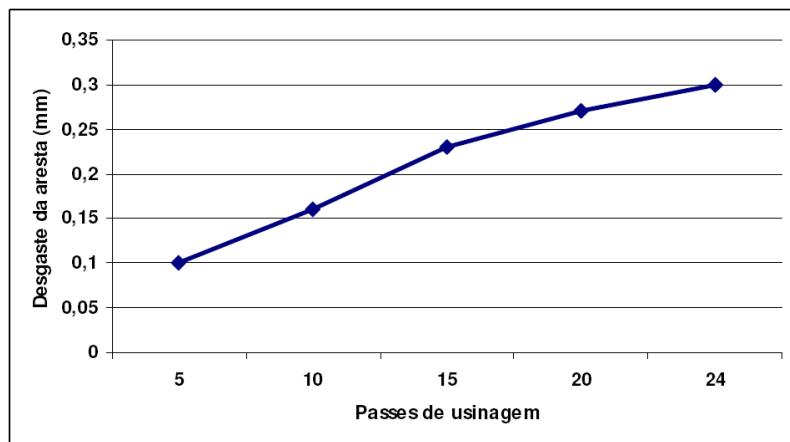
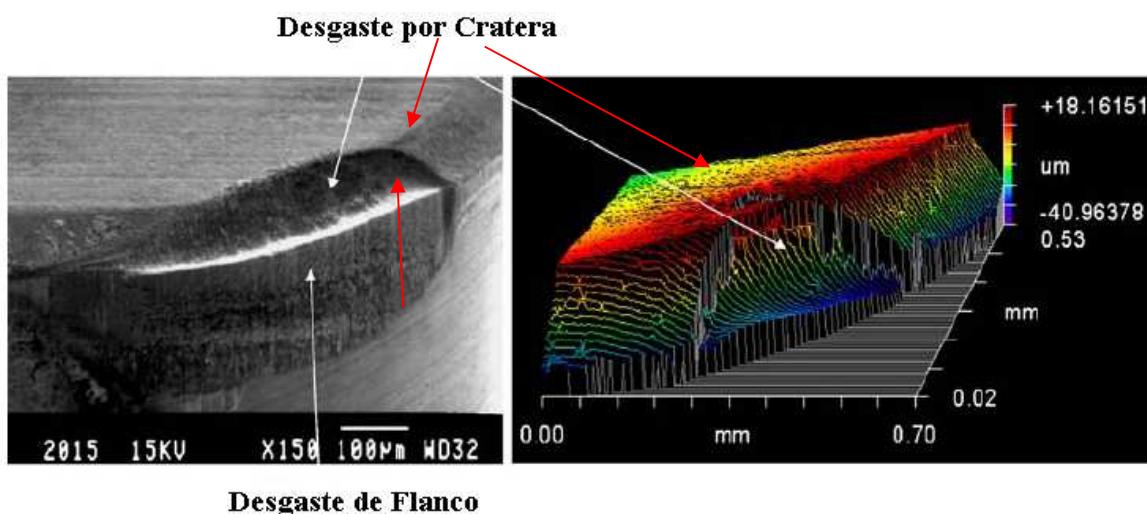


Figura 19 - Evolução do desgaste da ferramenta na usinagem a seco (Pereira, 2006)

Durante a operação de torneamento duro, o aparecimento de crateras ou lascas é normalmente um dos desafios na indústria metal-mecânica. (Huang, Chou, & Liang, 2007) apresenta um estudo sobre o desgaste em ferramentas de CBN no processo de torneamento duro e demonstra os típicos problemas que podem surgir pela alta temperatura e esforço do material, principalmente para altas velocidades de corte (V_c) conforme Figura 20.



Desgaste de Flanco

Figura 20 - Detalhe do desgaste da ferramenta na usinagem a seco (Huang, Chou, & Liang, 2007)

Dentre os problemas mais comuns, estão o desgaste de flanco, aparecimento de crateras, desgaste do raio da ferramenta, lascas e micro trincas, as quais, normalmente aparecem por baixo do revestimento superficial e, são impossíveis de se observar sem um microscópio; (Huang, Chou, & Liang, 2007).

Nos experimentos realizados por (Vogl, 2007) é feita uma análise das arestas de corte de três tipos diferentes de ferramentas no microscópio óptico após o torneamento duro do alumínio ASTM 7050.

A Figura 21, permite observar uma diminuição visível dos níveis de deposição na aresta de corte e uma maior deposição de material na aresta de corte, a qual tende a ocorrer em baixas velocidades.

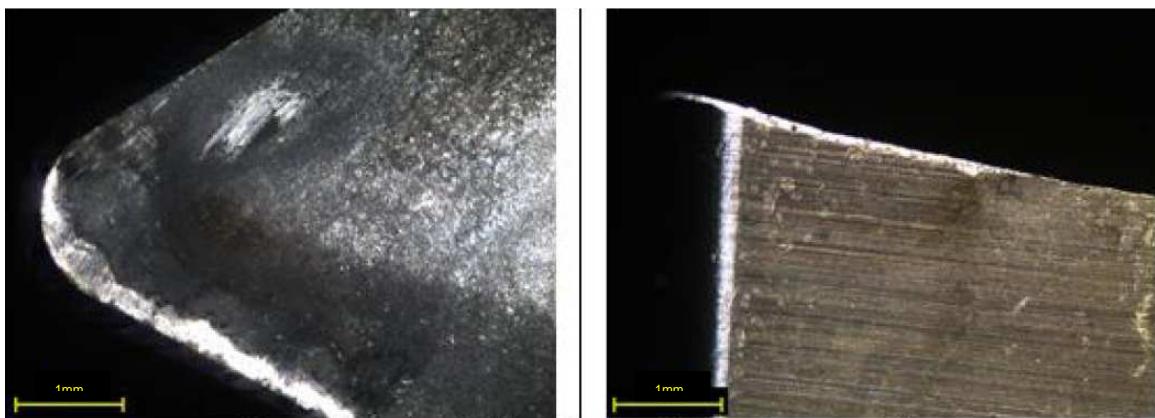


Figura 21 - Análise visual das ferramentas “T” aplicadas a $V_c = 100\text{m/min}$ e $f = 0,02\text{mm/v}$ com fluído de corte (Vogl, 2007)

O desgaste é a maior causa de perdas de material e diminuição do desempenho mecânico, sendo assim, qualquer redução deste desgaste pode resultar em consideráveis ganhos ao sistema; (Rosário, 2011). Ainda segundo o autor, o atrito é a maior causa dos problemas relacionados a usinagem seca, sendo assim, acredita que a lubrificação é um meio efetivo de controlar o desgaste da ferramenta.

2.6 Rugosidade superficial

A produção de peças com rugosidade superficial (R_a) menores que $0,2\mu\text{m}$ em usinagens de materiais endurecidos sempre foi um desafio para a indústria metal-mecânico. Principalmente quando se deseja utilizar o torneamento como uma alternativa mais eficiente em substituição ao processo de retificação convencional. Comumente, atribui-se a relação entre o avanço e o raio da ponta da ferramenta a obtenção de um bom acabamento superficial na peça, como pode ser observado na Figura 22, portanto, recomenda-se a seguinte relação máxima entre o raio (r) e o avanço (f) em operações de acabamento.

$$R_{\text{máx}} (\mu\text{m}) = \frac{f^2}{8 \times r}$$

Onde: r = raio de ponta da ferramenta

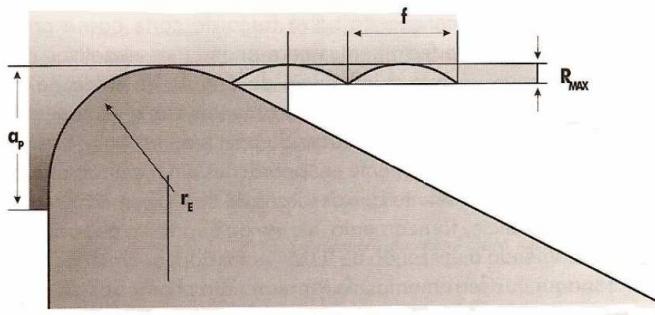


Figura 22 - Perfil teórico de rugosidade (Diniz, Marcondes, & Coppini, 2008)

Alguns trabalhos apresentam resultados de rugosidade satisfatórios em aços mais duros; (Chen, 2000) como apresentado na Figura 23 onde se identifica uma maior ocorrência de resultados com baixa rugosidade para materiais endurecidos.

(Chen, 2000) submeteu ferramentas de CBN ao processo de torneamento duro do aço GB699-88 temperados entre 45 e 55 HRC com o objetivo de medir as forças de corte e a rugosidade superficial dos corpos de prova. Os parâmetros de usinagem variaram entre $V_c = 56 - 182$ m/min, $f = 0,08 - 0,31$ mm/v e $a_p = 0,025 - 0,10$ mm.

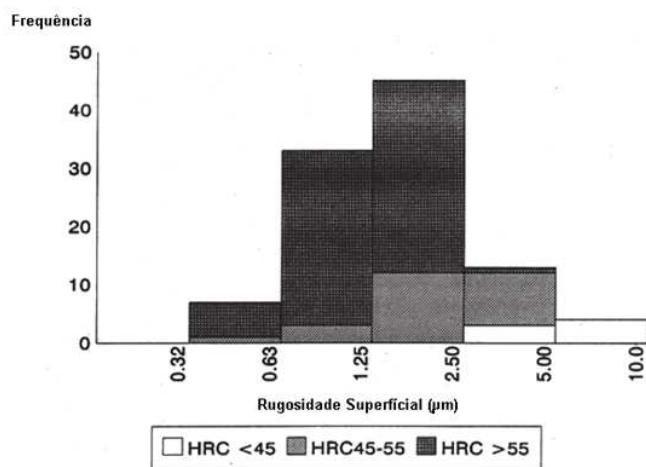


Figura 23 - Histograma da rugosidade superficial para diferentes especificações de dureza e mesmos parâmetros de usinagem (Chen, 2000)

Na usinagem de materiais endurecidos a deformação resultante do esforço da aresta de corte paralela à peça, apesar de pequena, causa uma deformação plástica no material usinado

conforme observado na Figura 24. Ainda segundo o autor, quanto maior a dureza do material, a plasticidade do material é reduzida e consequentemente a deformação lateral da crista; (Chen, 2000) Como resultado, a rugosidade superficial reduz.

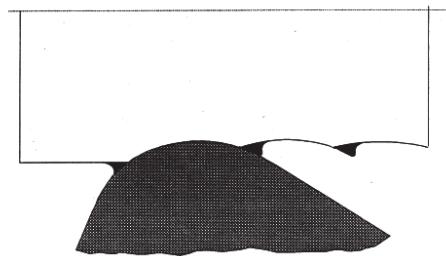


Figura 24 - Desenho esquemático da deformação plástica resultante do esforço de corte; (Chen, 2000)

Além da variação de rugosidade superficial apresentada pela Figura 23, é possível identificar na literatura variações de resultados com diferente raio de ferramenta; (Vogl, 2007), (Gonçalves, 2009), (Dogra, Sharma, Sachdeva, Suri, & Dureja, 2010) e (Zhang, Yan, & Kuriyagawa, 2011).

Na Figura 25, (Chen, 2000) apresenta resultados que comprovam que a variação do avanço pode representar um menor impacto na rugosidade final para ferramentas com raio de ponta maior.

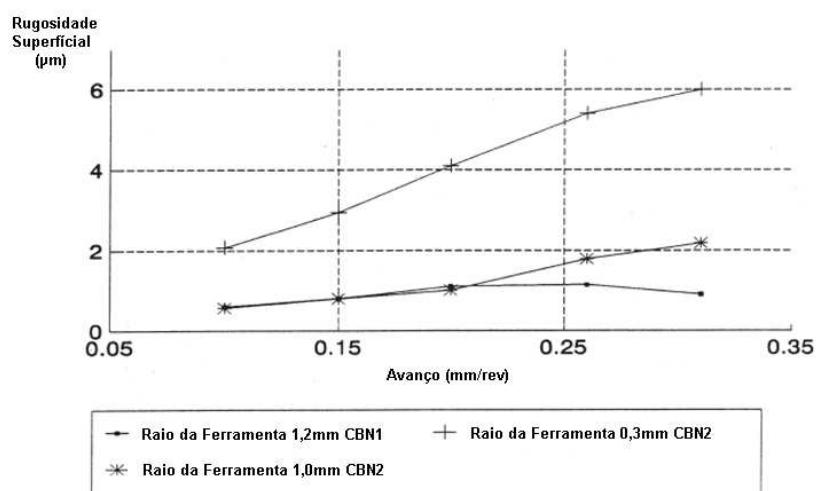


Figura 25 - Rugosidade superficial em comparação a três diferentes raios de ferramenta, $V_c = 85 \text{ m/min}$, $a_p = 0,1\text{mm}$; (Chen, 2000)

No experimento de usinagem do aço de corte fácil ABNT 12L14 com ferramentas de metal duro classe ISO P35; (Júnior, 2010), são apresentados as seguintes superfícies de resposta para a rugosidade em função das variáveis de processo: avanço (f), velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (a_p), como pode ser observado na Figura 26.

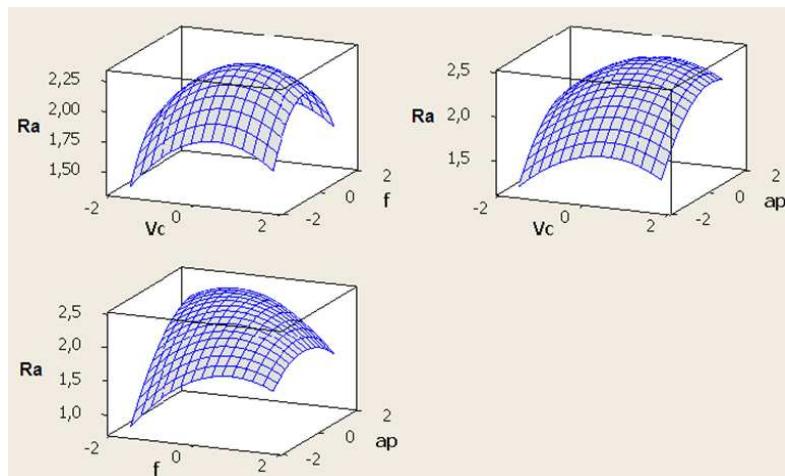


Figura 26 - Superfície de resposta gerada pelo DOE para variável Ra; (Júnior, 2010)

A variação de rugosidade também é observada quando são efetuadas comparações com e sem lubrificação; (Vogl, 2007) apresentou um estudo de usinagem da liga de alumínio ASTM 7050 por meio da variação das condições de usinagem, entre elas, a presença ou não de fluído.

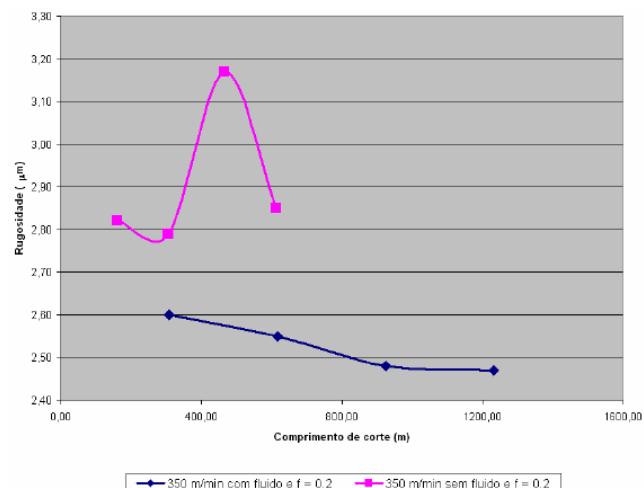


Figura 27 - Rugosidade (Ra) em função do comprimento de corte; (Vogl, 2007)

Na Figura 27 observa-se que os valores de rugosidade superficial são melhores quando da utilização de fluido de corte, fato que também se confirma quanto a preservação da aresta de corte. Isto se dá provavelmente pela deformação do material do cavaco e do retardo no seu cisalhamento.

Rosário (2011) realizou testes de torneamento de face em corpos de prova de aço ABNT 52100 endurecidos a 55 HRC com o uso de pastilhas de metal duro recobertas com multicamadas de Al_2O_3 e sobre uma camada de TiCN e uma camada de TiN.

O revestimento superficial nos insertos de usinagem permite uma maior resistência ao desgaste pelo problema de adesão principalmente pela redução do atrito, maior proteção térmica e redução das forças de corte; (Friedrich, 2008).

As Figuras 28, 29, 30 e 31 apresentam o gráfico de resposta para a rugosidade Ra para os diferentes parâmetros de corte escolhidos na usinagem do aço ABNT 52100.

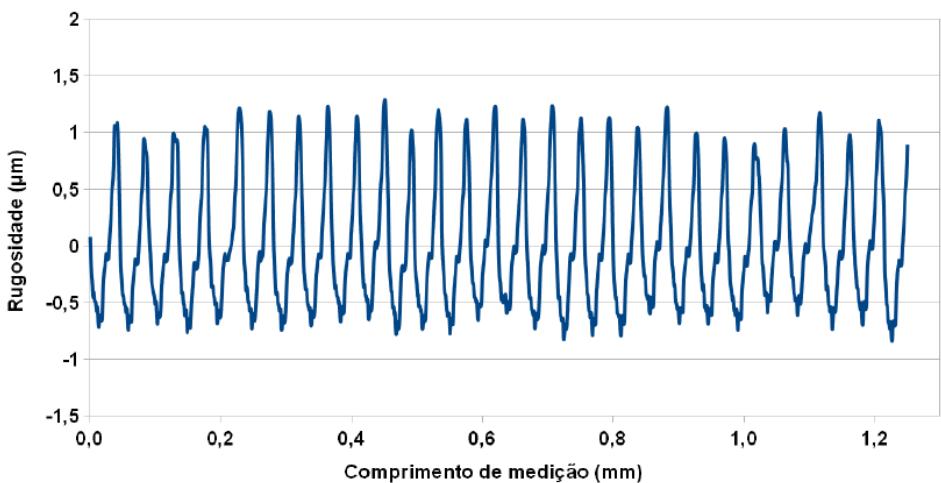


Figura 28 - Perfil de rugosidade (Ra) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 60\text{m/min}$ e $f = 0,05\text{mm/v.}$ (Rosário, 2011)

Os resultados obtidos pelas Figura 28 e 29 se apresentaram similares na rugosidade final Ra , enquanto que os dados relativos a Figura 30 apresentou melhor rugosidade, ou seja, valores menores de Ra ; Segundo (Rosário, 2011). As superfícies geradas a partir de um maior avanço e maior velocidade de corte, conforme Figura 29 e 31 tiveram maior espaçamento entre os picos e vales do perfil da rugosidade. Por este motivo a Figura 31 apresenta dados de rugosidade piores, ou seja, mais altos.

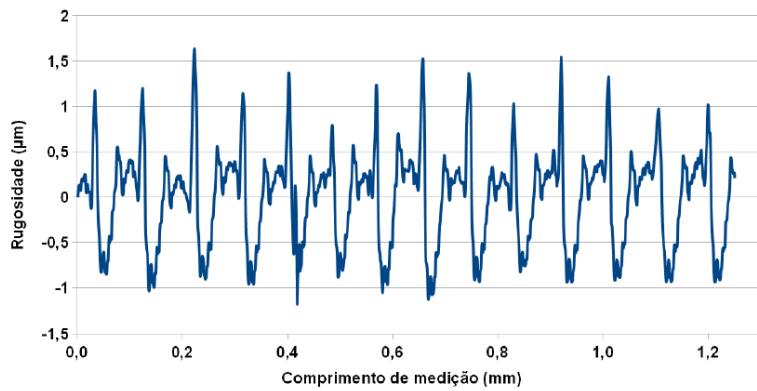


Figura 29 - Perfil de rugosidade (Ra) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 60\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v.}$ (Rosário, 2011)

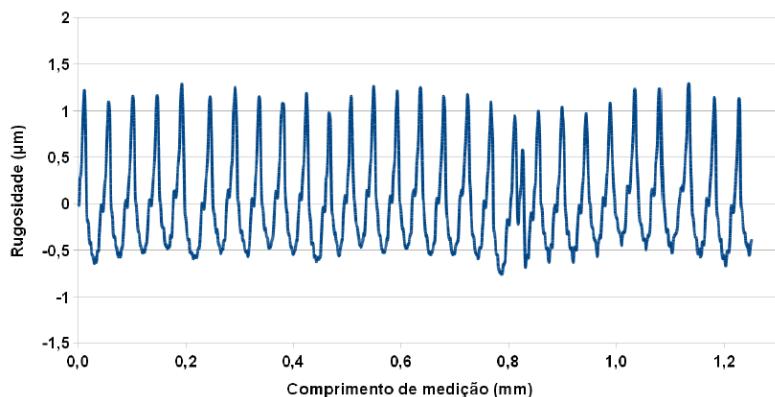


Figura 30 - Perfil de rugosidade (Ra) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 120\text{m/min}$ e $f = 0,05\text{mm/v.}$ (Rosário, 2011)

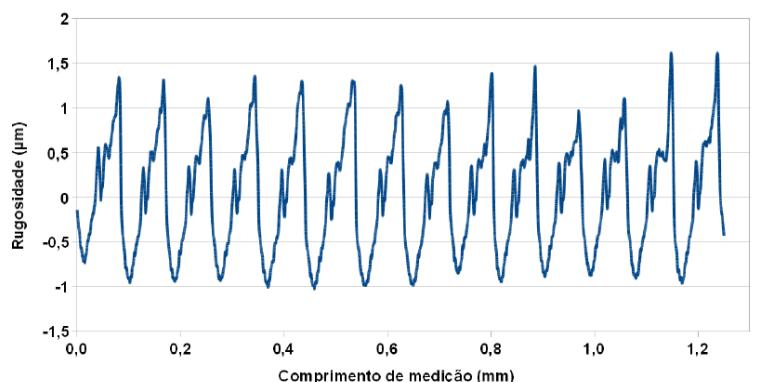


Figura 31 - Perfil de rugosidade (Ra) na superfície do corpo de prova na condição de $V_c = 120\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v.}$ (Rosário, 2011)

Nas condições apresentadas de menor velocidade de corte (V_c), o parâmetro de avanço (f) não influenciou significativamente a altura dos picos e vales. A combinação de menor avanço ($f = 0,01\text{mm/v}$) e maior velocidade de corte ($V_c = 120\text{m/min}$) apresentou os melhores resultados de rugosidade (R_a).

O autor também realizou a medição de rugosidade a partir da retífica plana do mesmo aço endurecido. Comparando-se os resultados com a Figura 32 e conclui que os valores de rugosidade apresentados são melhores devido o uso dos múltiplos cortes provenientes dos grãos abrasivos do rebolo; (Rosário, 2011).

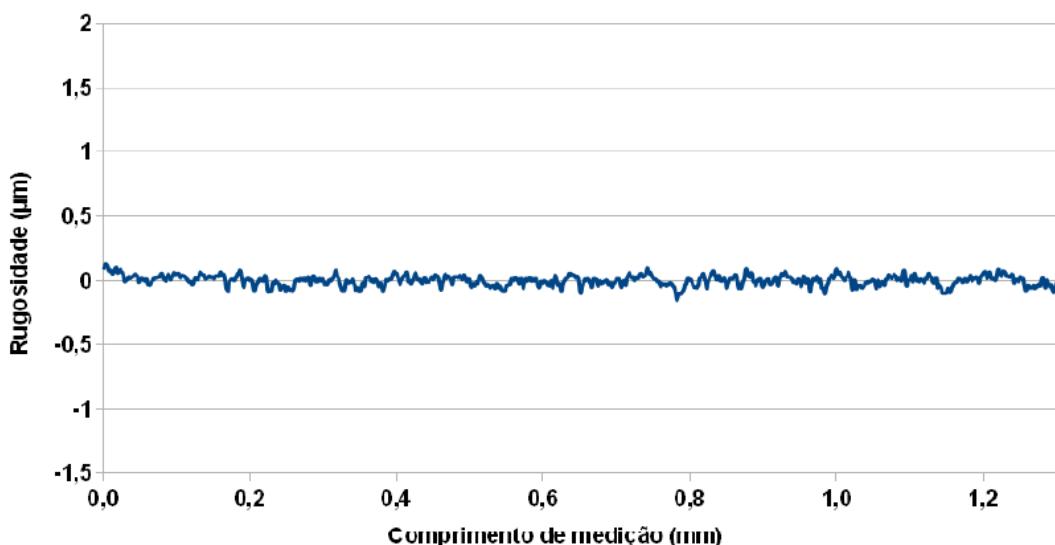


Figura 32 - Perfil de rugosidade (R_a) na superfície do corpo de prova na condição retificação com $V_c = 54\text{m/s}$ e $f = 4\text{m/min}$ e $ap = 0,03\text{mm}$. (Rosário, 2011)

Nos estudos apresentados por (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009) basicamente a rugosidade superficial melhora ao ponto que a velocidade de corte (V_c) aumenta, conforme Figura 33. Ainda segundo o autor, acima de um limite de V_c , a rugosidade é estabilizada por conta da queda nas forças de corte.

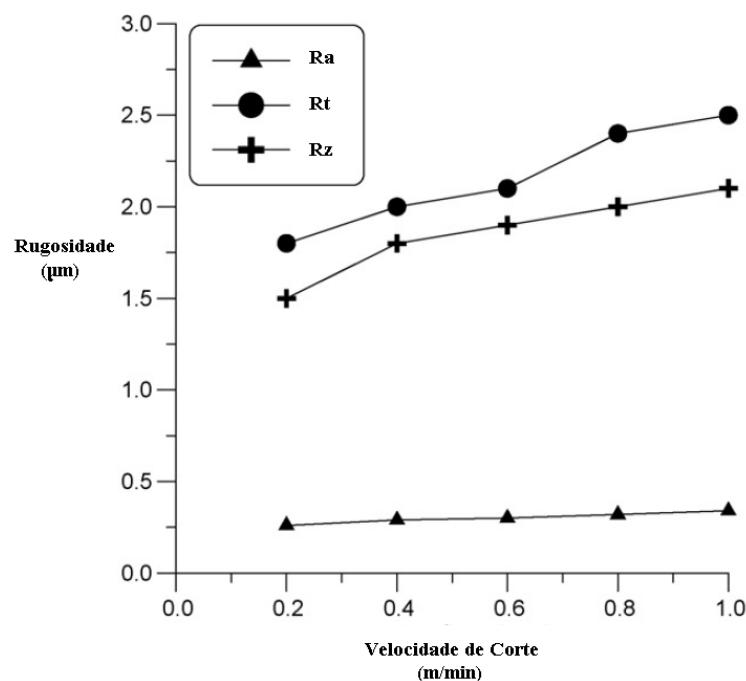


Figura 33 - Efeito da velocidade de corte (Vc) na rugosidade (Ra, Rt e Rz) para $ap = 0,2\text{mm}$ e $f = 0,08\text{mm/v}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

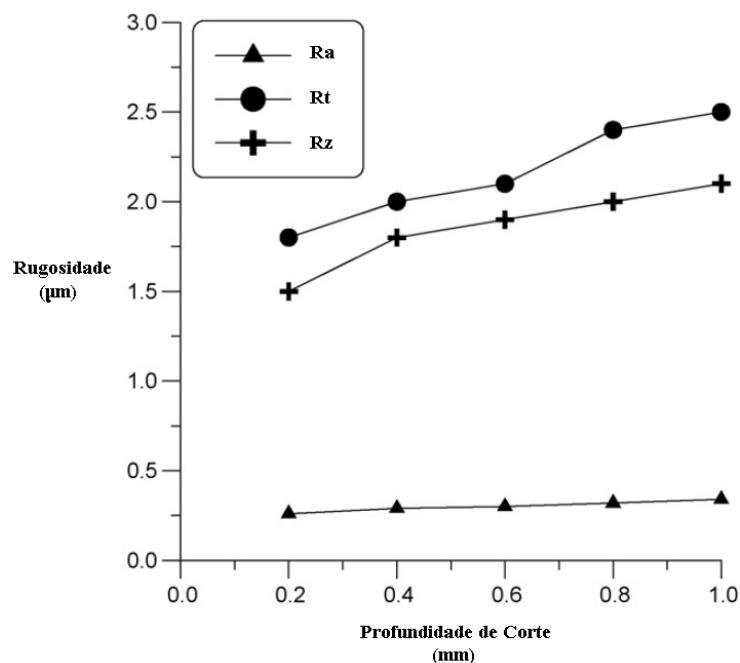


Figura 34 - Efeito da profundidade de corte (ap) na rugosidade (Ra, Rt e Rz) para $Vc = 90\text{m/min}$ e $f = 0,08\text{mm/v}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

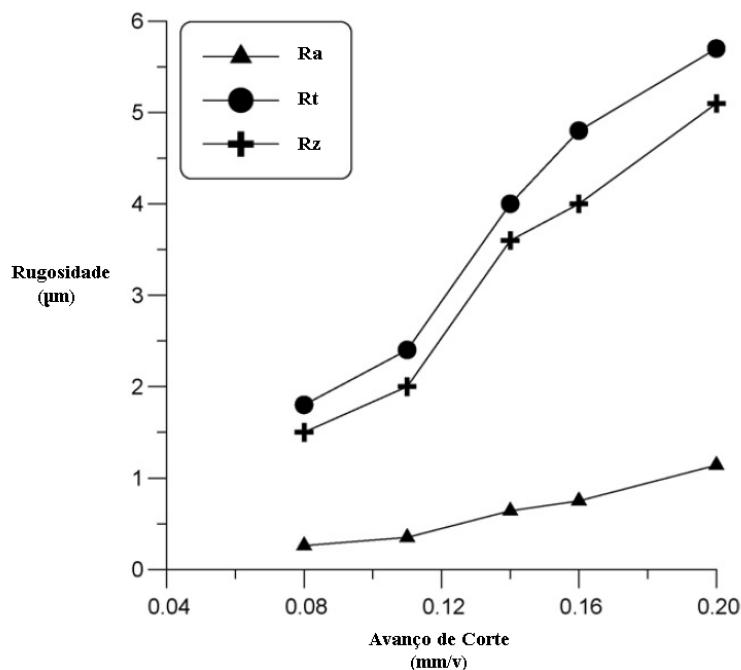


Figura 35 - Efeito do avanço de corte (f) na rugosidade (Ra, Rt e Rz) para $V_c = 90\text{m/min}$ e $ap = 0,2\text{mm}$; (Yallese, Chaoui, Keghib, Boulanouar, & Rigal, 2009)

Conforme Figuras 34 e 35, com o aumento da profundidade de corte (ap) e do avanço de corte (f) a superfície perde qualidade e a rugosidade aumenta.

2.7 Pesquisa experimental

Uma pesquisa experimental é aquela na qual o investigador analisa o problema, constrói suas hipóteses e trabalha manipulando os possíveis fatores e variáveis que se referem ao fenômeno observado para avaliar, a partir de suas inter-relações, suas saídas e criar hipóteses; Segundo (Köche, 2012).

Neste contexto, a metodologia do Projeto de Experimentos (DOE) surge como uma ferramenta para a manipulação de dados e variáveis de entrada e saída com o objetivo de reduzir o tempo de análise de dados e propiciar ao investigador uma avaliação clara e objetiva dos resultados obtidos na experimentação.

Um experimento é um procedimento no qual alterações propositais são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possa avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões destas alterações; (Werkema, 1996).

A manipulação e controle das variáveis independentes é a característica da pesquisa experimental. A dificuldade em planejar e manipular dados que meçam a relação entre tais variáveis é um dos objetivos pelo qual o DOE tem sido amplamente utilizado no meio acadêmico; (Köche, 2012).

(Santos, 2008) por exemplo, propõe uma avaliação da temperatura de aquecimento das ferramentas no processo de torneamento, utilizando se o método estatístico do projeto de experimentos. Aplicou-se um modelo matemático a partir da variação de parâmetros de corte na usinagem em um aço AISI 1045 e ferramentas P20 revestidas com TiN para 3 diferentes velocidades de corte ($V_c = 72\text{m/min}$, $V_c = 103\text{m/min}$ e $V_c = 145\text{m/min}$). Comparando os resultados da análise matemática foi possível obter a Figura 36 onde há a visualização tridimensional da temperatura no instante do aquecimento pelo processo de torneamento.

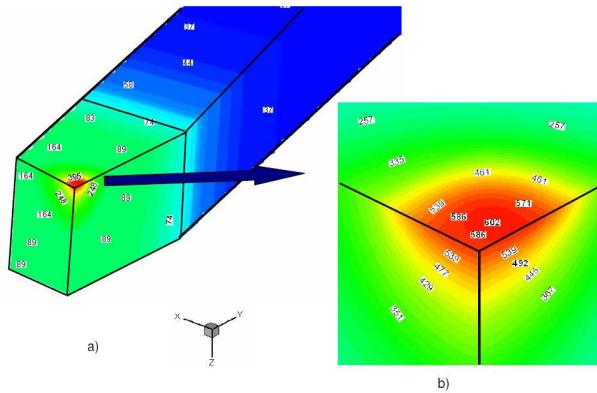


Figura 36 - distribuição da temperatura a partir do fluxo de calor na usinagem pelo processo de torneamento: escala 3:1 (a) e 20:1 (b);
(Santos, 2008)

Durante o processo de usinagem a temperatura tende a se comportar conforme Figura 37, ou seja, com temperatura máxima localizada a uma certa distância da aresta de corte; (Santos, 2008).

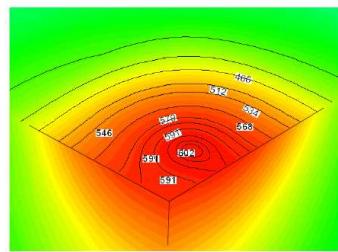


Figura 37 - Detalhe do calor gerado na ferramenta no processo de torneamento: escala 60:1 (Santos, 2008)

Outro exemplo da aplicação do DOE na atividade de planejamento e análise de dados durante o processo de torneamento duro é apresentado no estudo da usinagem do carbeto de tungstênio, ou metal duro, utilizando uma ferramenta de ponta de diamante no torno; (Gonçalves, 2009). Na usinagem de materiais frágeis, e muitas vezes de elevado custo, como o caso do metal duro, a aplicação de uma metodologia como o DOE pode significar uma redução de custo significativa, pois, apresenta conceitos que permitem a otimização dos recursos com a aplicação do número mínimo de experimentos para uma saída relevante.

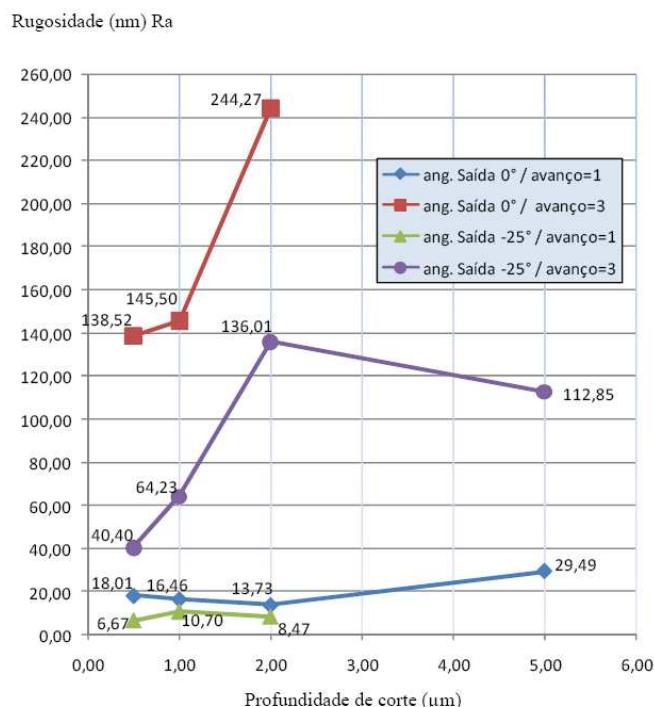


Figura 38 - Gráfico dos resultados de rugosidade (Ra) em função da profundidade de corte e avanço; (Gonçalves, 2009)

(Gonçalves, 2009) observou que a rugosidade obtida no processo de torneamento do metal duro a partir da variação de parâmetros de profundidade de corte entre $1\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$ e avanço entre $0,5\mu\text{m}/\text{v}$, $1\mu\text{m}/\text{v}$ e $2\mu\text{m}/\text{v}$ para dois tipos de saídas de ferramentas, com 0° e 25° , obtendo os resultados de rugosidade apresentados na Figura 38.

De maneira geral, um fluxograma de pesquisa experimental deve contemplar diferentes etapas de análise e construção; (Köche, 2012). A Figura 39 é apresentada por (Köche, 2012) para demonstrar esta sequencia sugerida.



Figura 39 - Fluxograma da pesquisa científica e projeto de experimentos. (Köche, 2012)

A seguir serão apresentados detalhes das etapas do procedimento experimental apresentado:

1. Etapa de Preparação

Deve ser dedicada a definição do tema, à delimitação do problema, à revisão da literatura, construção do marco teórico e construção das hipóteses. O objetivo fundamental desta etapa é o investigador definir o problema que irá investigar.

Outro fator importante é a delimitação do problema a partir do qual os limites do estudo ficam claros e as dúvidas sobre os resultados eliminadas.

2. Elaboração do Projeto de Pesquisa

Neste momento inicia-se a construção do plano que irá estabelecer a sequência de investigação, tendo como orientação o problema e as hipóteses levantadas na etapa anterior. Neste momento defini-se a metodologia, ou seja, como, onde e quando os processos seguintes serão executados. Nesta fase haverá a definição das variáveis, assim como, o método de medição dos fatores que será utilizado para se avaliar as respostas do experimento definidas na fase anterior.

3. Etapa de Execução

Esta etapa de execução irá proporcionar a coleta de dados propriamente ditas a partir da condução do plano previamente definido na elaboração do projeto. É nesta fase que se inicia a tabulação dos dados com base nos testes realizados; (Köche, 2012). A partir destas saídas se pode observar as relações entre as variáveis e concluir a fase de avaliação.

4. Construção do relatório de pesquisa

A quarta e última etapa é dedicada a formatação do relatório e apresentação a comunidade científica a partir de um fluxo de exposição que ofereça de maneira clara e objetiva os passos anteriores.

Como já mencionado, todos os processos de experimentação que envolvem coleta de dados devem ser usados com apoio em planos estruturados para a condução dos trabalhos. Estes planos são chamados de projeto de experimentos e tais projetos podem ser classificados com os seguintes critérios; (Werkema, 1996), são eles:

- pelo número de fatores a serem estudados;
- pela estrutura do planejamento experimental;
- pelo tipo de informação que o experimento pode fornecer.

2.8 Experimentos fatoriais com dois ou mais fatores

Quando se deseja estudar os efeitos de dois ou mais fatores, os chamados experimentos ou planejamentos fatoriais podem ser utilizados. Um planejamento fatorial é aquele no qual, para cada réplica completa do experimento, todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores são pesquisadas. De uma forma geral, pode-se dizer que as variáveis são cruzadas a fim de observar suas inter-relações; (Köche, 2012).

Algumas vantagens podem ser destacadas no que diz respeito ao cruzamento de variáveis em conjunto, dentre elas a vantagem de entender interação, que sozinhos poderiam não ser capazes de identificar.

As repostas obtidas por meio da análise conjunta de diferentes fatores podem oferecer respostas mais claras diante das diferentes variáveis. (Abhang, 2012) apresenta uma interação entre o avanço (f) e a velocidade de corte (Vc) a partir de um gráfico de superfície 3D conforme Figura 40, gerado por meio da análise de dados feita pela relação de dois fatores na

análise da temperatura de corte durante o torneamento de um aço inoxidável comercial EN-31.

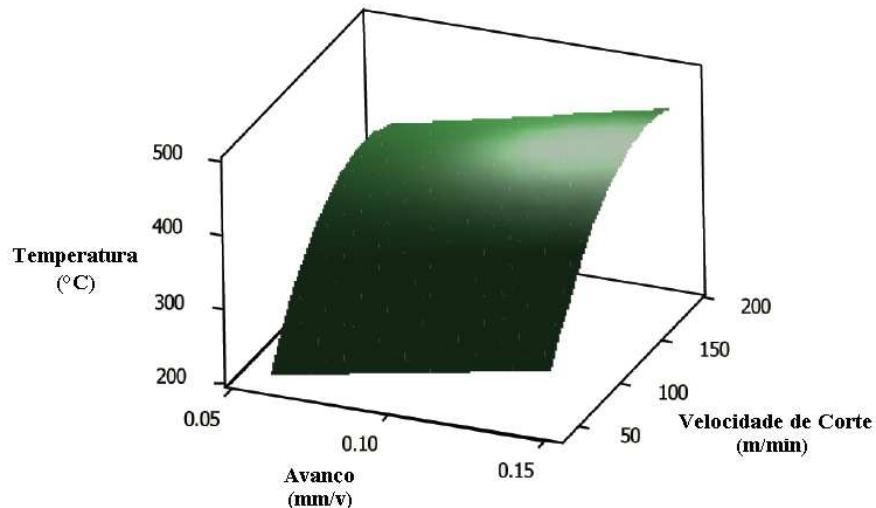


Figura 40 - Superfície 3D gerada a partir da variação dos parâmetros de velocidade de corte e avanço em relação a temperatura da ferramenta (Abhang, 2012)

A análise de experimentos fatoriais com dois fatores pode ser estendida para o caso de uma análise com mais de dois fatores; (Werkema, 1996) e o uso da superfície de resposta em 3D permite prever as saídas, tais como rugosidade superficial ou circularidade com elevado grau de confiança; (Sahin & Motorcu, 2012).

Capítulo 3

3. Experimentação

Neste capítulo é descrita a metodologia de ensaio empregada neste trabalho, materiais e meios utilizados. A metodologia foi composta de uma primeira etapa na qual foi escolhido o material a ser usinados, sua preparação e tratamento térmico, bem como exemplos de aplicação prática na indústria. Posteriormente, será apresentada a ferramenta escolhida para esta usinagem e suas características. Ainda neste capítulo, tem-se o objetivo de detalhar os equipamentos de medição e torno aplicados para a este experimento e por fim detalhar os parâmetros de corte escolhidos e aplicados ao delineamento de experimentos (DOE).

Todos os ensaios de torneamento foram planejados com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de corte (avanço e velocidade de corte) no acabamento superficial das peças usinadas neste tipo de material, pois, a simulação do acabamento superficial permite a indústria de moldes uma aplicação mais eficiente de ferramentas para conformação mecânica.

Considerando tal precisão e exigência para este tipo de ferramenta, foi adotada como critério de qualidade para o corpo de prova uma rugosidade limite de $R_a=0,20\mu m$. Tal critério foi adotado porque, acima deste valor, a aplicação da ferramenta a qual se destina o corpo de prova perde rendimento de trabalho e reduz a qualidade final do produto, como exposto anteriormente.

3.1 Máquina ferramenta

Os experimentos constantes do presente trabalho e a preparação dos corpos de prova foram desenvolvidos no Laboratório de Mecânica da Universidade Nove de Julho de São Paulo, campus de Santo Amaro. Os ensaios foram realizados em um Torno CNC Romi GL240 Ano 2010, comando GE-Fanuc 0i-TC, com projeto mecânico convencional, ou seja, com mancais de rolamento e guias de escorregamento, potência máxima de eixo de 20 CV; rotação máxima de 6000 RPM, torre com doze posições com travamento hidráulico, torque máximo de 110 N.m e equipado com sistema de refrigeração de corte com motobomba (10 lpm @ 2 bar, 0,75cv) abastecido com óleo solúvel Lubrax Compsor RF/68 conforme apresentado na Figura 41:



Figura 41 – Torno CNC de precisão marca Romi modelo GL240 utilizado para usinagem do material endurecido.

3.2 Material usinado

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados a partir do aço rápido AISI M4 fabricados a partir da metalurgia do pó. Este aço foi escolhido, pois, sua aplicação na indústria de moldes para conformação de embalagens metálicas a frio permite uma elevada resistência ao impacto devido alta resistência estrutural; (Qiang, Bijlaard, & Kolstein, 2012). Hoje grande parte destas ferramentas ainda é utilizada como o exposto neste trabalho, no entanto, algumas tendências estimulam a aplicação de revestimentos superficiais adicionais ao

processo de tempera com o objetivo de aumentar o coeficiente de resistência ao desgaste e reduzir o coeficiente de atrito, facilitando assim o processo de conformação. Neste contexto, a escolha de uma aplicação eficiente de torneamento duro com rugosidades abaixo de $0,20\mu\text{m}$ se faz ainda mais importante pela necessidade de aderência do revestimento superficial ao substrato.

A Tabela 2 apresenta a composição química do aço AISI M4 atualmente encontrado no mercado e obtido a partir do certificado de qualidade emitido pelo fornecedor.

Tabela 2 - Composição química do aço AISI M4; (Bohler, 2011)

Elemento	Composição Química (%)				
	C	Cr	Mo	V	W
Teor	1,33	4,30	4,90	4,10	5,90

Os corpos de prova foram preparados a partir do corte de uma barra de aço AISI M4, desbastados no torno e posteriormente tratados termicamente para aumento de dureza, nas instalações da Proterm – São José dos Campos.

O tratamento térmico realizado nos corpos de prova para que os mesmos, por ocasião da usinagem, estivessem no seu estado temperado e revenido a 64 HRC foi executado de acordo com as recomendações do fabricante (Bohler) respeitando-se as seguintes fases representadas pela Figura 42:

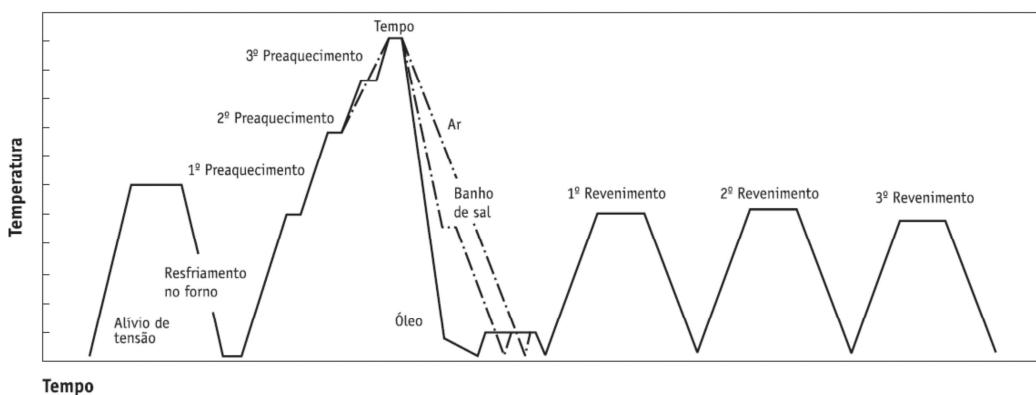


Figura 42 - Sequencia de tratamento térmico do aço AISI M4; (Bohler, 2011)

O processo de tratamento térmico foi controlado para que, após este, os corpos de prova apresentassem dureza de 64 HRc +/- 1 HRc, até uma profundidade de 2,5mm no mínimo. Estas especificações só foram possíveis com o uso de um forno à vácuo convencional, pois, com as etapas de usinagem em curso, a variação de dureza não deve interferir nos resultados de rugosidade ou desgaste da ferramenta, mesmo com a variação do diâmetro após algumas etapas de usinagem da peça.

Na Figura 43 são mostradas as dimensões dos corpos de prova preparados para os ensaios. O diâmetro de 50,00mm foi feito para que seja fixado na placa do torno com o objetivo de evitar quaisquer quebras na aresta de corte dos insertos pela vibração proveniente da fixação das peças na castanha. O diâmetro de 40,00mm foi utilizado para usinagem dura e sua circularidade mensurada para averiguação da capacidade de manutenção do perfil desta ferramenta, conforme será descrito a frente.

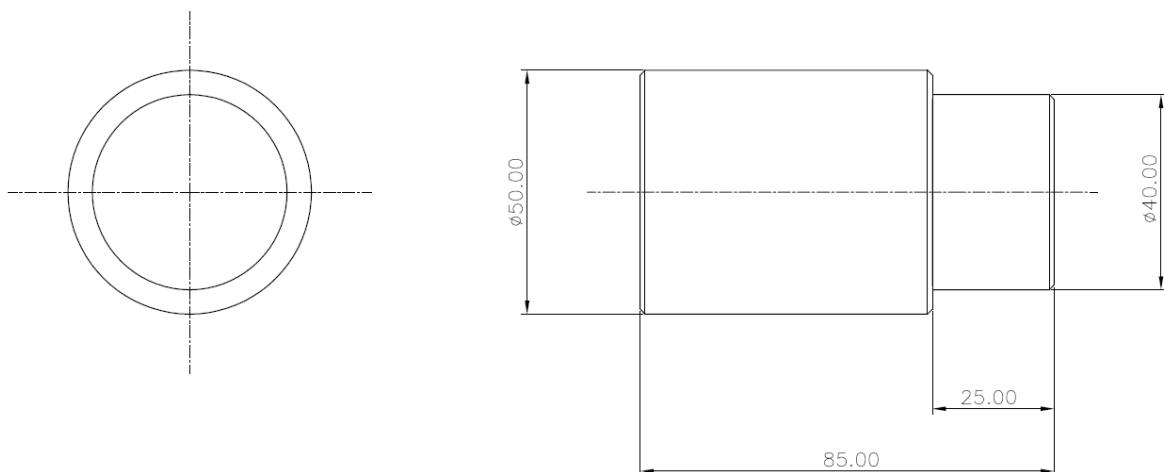


Figura 43 - Dimensões dos corpos de prova do aço AISI M4 com dureza 64 HRc.

3.3 Ferramentas de Corte

No processo de torneamento duro, o inserto (Figura 44) utilizado para a usinagem dos corpos de prova durante todos os ensaios estão descritos a seguir. Este tipo de inserto foi

escolhido pelas suas qualidades apresentadas no processo de torneamento duro; (Chou, Evans, & Brarash, 2002).

- Inserto: insertos intercambiáveis de metal duro, Sandvik, classe CBN, recoberta com uma camada de Nitreto de Titânio (TiN), com geometria ISO TNGA 160408 T01020 classe 7015.

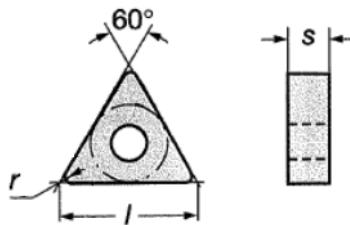
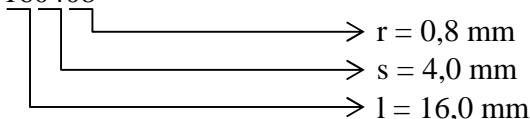


Figura 44 - Geometria ISO TNGA 160408 do inserto de CBN

Onde: TNGA 160408



3.4 Parâmetros

Nos ensaios realizados foram adotados três níveis de variação para cada um dos parâmetros de usinagem estudados. A Tabela 3 apresenta os três fatores: velocidade de corte (V_c) e avanço (f) com seus respectivos níveis de variação e a profundidade de usinagem (a_p) fixa.

Os níveis foram definidos em conjunto com o fabricante das ferramentas e representam oportunidades de redução de custos e aumento de qualidade com consequente economia do tempo total de usinagem. Ainda pelos dados recomendados no catálogo do fabricante de ferramentas; (Sandvik, 2012) o avanço de corte é de 0,05mm/v e tal informação utilizada como referência para especificações do nível inferior e superior do experimento.

Tabela 3 - Parâmetros de usinagem utilizados

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Nível Inf.	Nível Médio	Nível Sup.
Velocidade de Corte	V_c	m/min	64	80	96
Avanço	f	mm/v	0,01	0,03	0,06
Profundidade de Corte	a_p	Mm	0,05		

Por meio da elaboração de um arranjo fatorial proceder-se-á à análise dos dados obtidos experimentalmente. A Tabela 4 apresenta as nove condições ensaiadas necessárias à obtenção dos *factorial points*.

Tabela 4 - Fatorial para os parâmetros de usinagem;

Nr. do Ensaio	Entrada x_1	Entrada x_2	V_c (m/min)	f (mm/v)
1	-1	-1	64	0,01
2	1	-1	96	0,01
3	-1	1	64	0,06
4	1	1	96	0,06
5	-1	0	64	0,03
6	0	-1	80	0,01
7	0	1	80	0,06
8	1	0	96	0,03
9	0	0	80	0,03

3.5 Medição das variáveis de saída

3.5.1 Medição de rugosidade (Ra)

As medições de rugosidade (R_a) dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Mecânica da Universidade Nove de Julho, utilizando-se de um Rugsímetro marca Mahr, modelo M-300C, conforme Figura 45, aferido e calibrado antes do início das medições. As

medidas de rugosidade foram realizadas sempre em dois pontos de uma reta paralela ao eixo longitudinal do corpo de prova.

Seguindo as recomendações da norma NBR-6405 (1988), foi utilizado um “*cut-off*” de 0,08mm (γ_c), e dois comprimentos de amostragem para cada medida, totalizando 0,16mm (γ_m).



Figura 45 – Rugosímetro Portátil M300C integrado a impressora marca Mahr.

3.5.2 Medição do desgaste da ferramenta (Vb)

As fotografias dos desgastes de flanco máximo (VB_{max}) na superfície de folga dos insertos, foram realizadas em um analisador de imagem, o qual constitui-se de um microscópio binocular óptico Olympus com ampliação de 40X conforme Figura 46, acoplado a um microcomputador IBM T410.



Figura 46 – Microscópio Olympus 40x.

3.5.3 Medição da circularidade (C)

A circularidade do corpo de prova após usinagem dura foi analisada pelo circularímetro marca Taylor Robson modelo Talyrond 131 conforme Figura 47.



Figura 47 – Circularímetro marca Taylor Hobson modelo Talyrond 131.

3.5.4 Medição de dureza (HRC)

A dureza superficial do corpo de prova foi avaliada antes e depois de cada ensaio por meio de um durômetro de bancada analógico marca Mitutoyo modelo Durotwin Plus conforme Figura 48.



Figura 48 – Durômetro de bancada analógico marca Mitutoyo modelo Durotwin Plus.

3.6 Procedimentos experimentais dos ensaios

Durante a etapa de desbaste para tratamento térmico, levou-se o cuidado de deixar 0,15mm de sobre-metal no diâmetro de 40,00mm para simular um pré-acabamento antes do processo de usinagem final, o qual se sujeita o estudo deste trabalho. Neste desbaste, o sobre-metal foi retirado sem o cuidado com o monitoramento da rugosidade superficial.

Após a preparação dos corpos de prova, o torneamento foi executado de acordo com os parâmetros de corte apresentados na Tabela 4 utilizando-se arestas de corte independentes para cada ensaio. Foram realizados três (3) passes de acabamento consecutivos empregando os mesmos parâmetros de corte que está sendo testada respeitando-se um intervalo de trinta (30) segundos entre cada passe para simulação da troca de peças e resfriamento normal da aresta de corte da ferramenta.

A medição de rugosidade superficial (R_a) e o estado da aresta de corte (desbaste V_b) foram inspecionados depois de cada ensaio descrito, sendo que para as medições de rugosidade, foram feitas sempre duas (2) medições para cada ensaio e o valor de saída foi definido como a média aritmética dos valores encontrados.

Nas superfícies torneadas para cada combinação de parâmetros de corte foram realizadas seis (6) repetições gerando a matriz de ensaios apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Resposta de saída para a rugosidade superficial R_a (μm).

Nr. do Ensaio	V_c (m/min)	f (mm/v)	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	R_{a4}	R_{a5}	R_{a6}	Tempo de usinagem (min)
1	64	0,01	0,09	0,12	0,12	0,13	0,12	0,15	5,58
2	96	0,01	0,25	0,25	0,22	0,26	0,24	0,27	3,44
3	64	0,06	0,28	0,28	0,30	0,31	0,32	0,32	0,95
4	96	0,06	0,37	0,36	0,36	0,35	0,33	0,32	0,63
5	64	0,03	0,21	0,20	0,22	0,23	0,22	0,24	1,88
6	80	0,01	0,10	0,11	0,10	0,09	0,11	0,12	4,50
7	80	0,06	0,34	0,34	0,31	0,34	0,28	0,31	0,83
8	96	0,03	0,15	0,15	0,15	0,12	0,12	0,11	1,25
9	80	0,03	0,15	0,15	0,16	0,19	0,20	0,21	1,67

Conforme recomendação do fornecedor de tratamento térmico, durante todo o processo de usinagem, em nenhum momento, os corpos de prova foram utilizados com dimensão inferior a 37,5mm de diâmetro, visto que, como já exposto, havia a preocupação de que a variação de dureza interna do material pudesse gerar qualquer tipo de alteração dos resultados da rugosidade final, circularidade ou desgaste de ferramenta. Estes dados foram controlados a partir da medição da dureza após cada passe de usinagem e os corpos de prova trocados ao se aproximarem do diâmetro em questão.

Ao final dos experimentos apresentados, apresenta-se uma comparação de usinagem sem óleo solúvel. Tal experimento tem o objetivo de oferecer dados comparativos de rugosidade para o conjunto de parâmetros que melhor resultado apresentou na usinagem com lubrificante solúvel e se apresentou viável a partir do estudo da literatura disponível.

Para análise dos resultados, utilizou-se o software STATISTICA® versão 6.0.

Capítulo 4

4. Resultados e Discussão

Este trabalho teve por objetivo principal estudar o efeito da rugosidade e circularidade superficial pela influência dos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte e avanço, no processo de torneamento do aço AISI M4 endurecido a 64 HRC e avaliar o comportamento da ferramenta de CBN nesta usinagem.

Para atingir este objetivo, utilizou-se a metodologia de projeto de experimentos, por meio da qual foram gerados os valores de entrada para cada ensaio proposto e os dados de saída para a Rugosidade R_a e a Circularidade C .

Ainda neste capítulo apresenta-se a discussão e análise dos dados obtidos no capítulo anterior e a relação existente entre os parâmetros de corte e a seu desempenho para a rugosidade superficial.

4.1 Análise da Rugosidade de Saída

São apresentados na Figura 49 os valores de rugosidade (R_a) da superfície usinada, expressos em μm , para cada uma das condições ensaiadas. Nos experimentos foram variados os parâmetros de velocidade de corte (V_c) entre os níveis 64 m/min e 96 m/min, avanço de usinagem (f) entre os níveis 0,01 mm/v, 0,03 mm/v e 0,06 mm/v, sendo mantida a profundidade de usinagem (a_p) no nível de 0,05 mm, sendo que em todos os ensaios foram utilizadas pastilhas de CBN recobertas com Nitreto de Titânio.

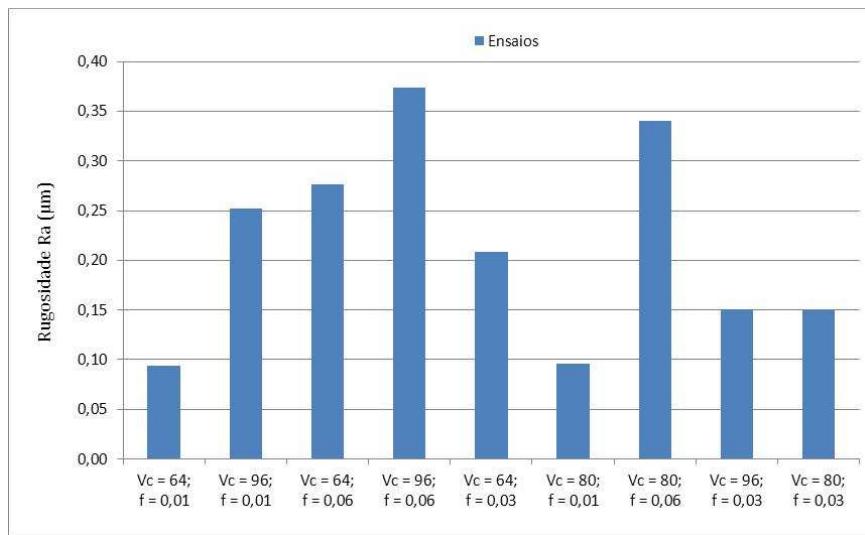


Figura 49- Média da rugosidade para a superfície usinada, medidas após primeiro ciclo de usinagem para cada parâmetro.

Nota-se uma grande coerência entre os valores ensaiados para os valores de rugosidade superficial, as quais foram tomadas após o primeiro ciclo de usinagem. Pode-se observar que a variação de rugosidade ocorre de formas similares para os diferentes parâmetros, exceto pelos pontos identificados pela velocidade de corte 96 m/min e avanço de 0,01 e 0,03mm/v, conforme Figura 50.

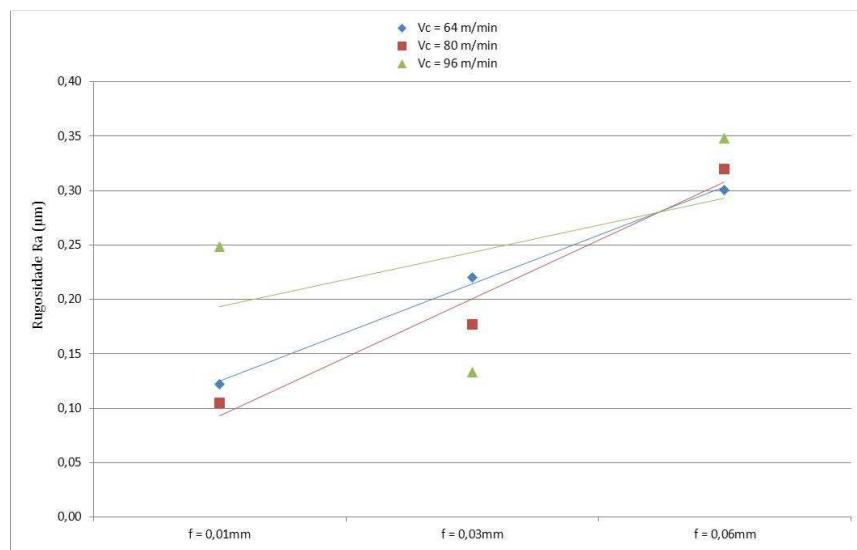


Figura 50 - Interações entre as variáveis de entrada e a rugosidade media

Uma análise mais precisa sobre os valores da rugosidade média e a influência de cada um dos fatores e suas respectivas interações apresentadas, forneceu subsídios para que o teste pudesse ser refeito para os pontos em questão mencionados na Figura 50. Estes dados são apresentados na Figura 51, os quais foram validados a partir de mais uma réplica para certificação.

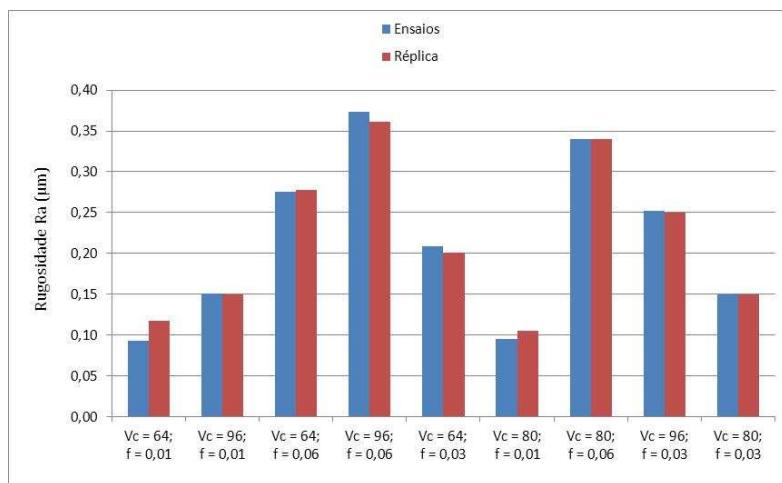


Figura 51 - Resultados dos novos ensaios considerando uma réplica

Pode observar-se uma coerência mais apropriada aos fatores de influência da rugosidade de saída na Figura 52.

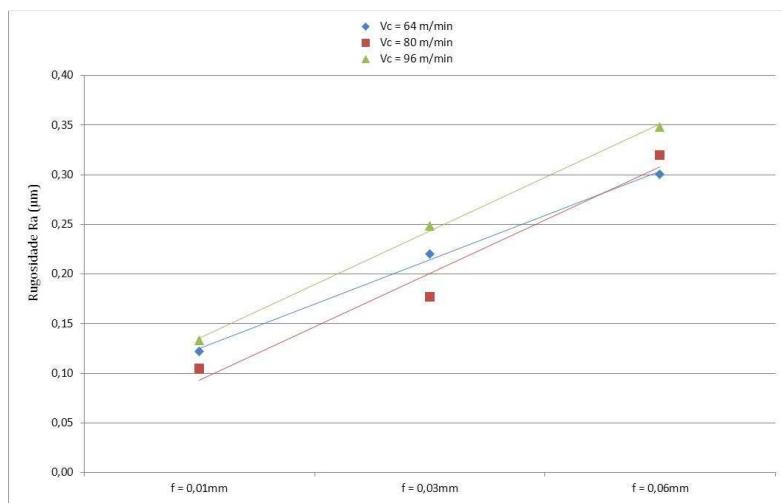


Figura 52 - Nova interação entre as variáveis de entrada e a rugosidade media.

Os resultados apresentados pelos pontos de avanço 0,001mm/v e 0,03mm/v com velocidade de corte de 96m/min são novamente analisados e observa-se que há uma divergência entre os valores apresentados no primeiro ensaio e os apresentados na Figura 50. Isto se deve ao fato de que provavelmente foram inseridos parâmetros errados no Torno para os ensaios de número 2 e 8, ou seja, velocidade de corte de 96 m/min e avanço de 0,01 e 0,03mm, respectivamente, durante a primeira análise.

Uma análise dos dados no Software STATISTICA® versão 6.0 apresenta de forma clara a evidência deste equívoco de programação durante a segunda fase de ensaios conforme Figura 53. Ainda nesta imagem pode-se confirmar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem (f). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, a interação da velocidade de corte, porém com um nível de significância inferior ao nível de significância do avanço de usinagem como pode ser observado na superfície de resposta em 3D pela Figura 53.

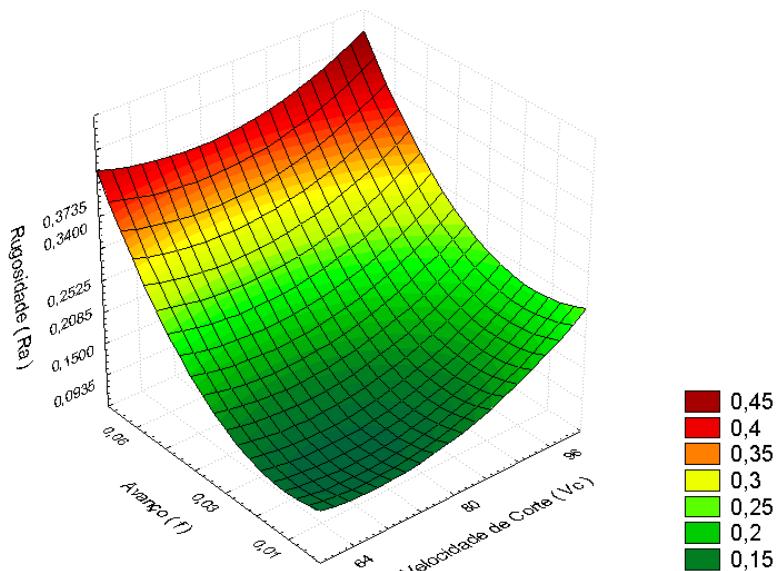


Figura 53 – Superfície de resposta para a Rugosidade (R_a) com relação à variação de velocidade de corte (V_c) e avanço (f)

A equação de saída para a variável de saída rugosidade é:

$$R_a = 0,681 - 0,0163V_c - 0,4142f + 0,0001V_c^2 - 0,0227V_cf + 84f^2$$

Observando a Figura 54, que fornece o gráfico dos efeitos principais V_c e f na rugosidade média da superfície da peça, pode-se notar que, dentre todos os efeitos principais, apenas o avanço de usinagem (f) possui influência significativa sobre o valor da rugosidade média. No entanto, é possível identificar ainda na Figura 54 que existe uma estabilidade na rugosidade final com o menor avanço ($f = 0,01\text{mm}/\text{v}$), independentemente da velocidade de corte para o ensaio realizado, o qual apresentou rugosidade superficial abaixo de $0,20\text{ }\mu\text{m}$, como será observado a seguir.

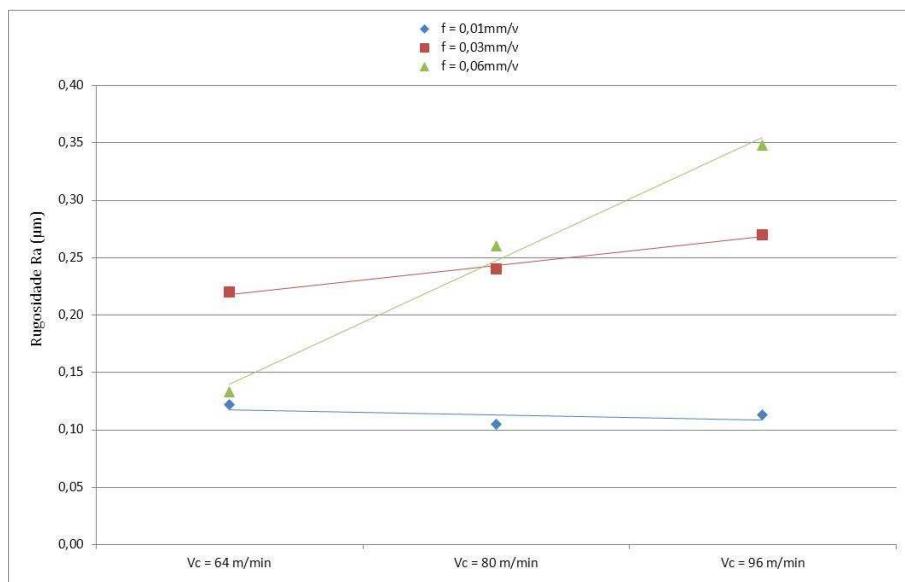


Figura 54 - Variação da rugosidade superficial em função da velocidade de corte

Uma interação mais significativa é percebida entre fatores V_c e f com parâmetros de velocidade de corte mais baixos, evidenciada por uma alteração na reta da Figura 54, principalmente quando se alteram estes dois valores simultaneamente.

Lembra-se que estes resultados são válidos apenas para o torneamento do aço AISI M4 temperado a 64 HRC, usinado com ferramentas novas de CBN, recoberta com TiN (geometria: ISO TNGA 160408 T01020) e com os parâmetros de corte variando nos níveis já mencionados neste trabalho.

As análises dos gráficos acima demonstram que o fator de maior influência exercida nos valores da rugosidade média da superfície usinada é o avanço de corte (f). A influência causada pelo avanço de corte pode ser facilmente visualizada ao comparar os valores de rugosidade medidos nos ensaios na Figura 52 durante a análise do acabamento superficial.

O gráfico 3D apresentado na Figura 53 representa confirma esta afirmação por meio da comparação das inclinações das curvas do eixo x e y, indicados pelos parâmetros de avanço (f) e velocidade de corte (V_c).

Outro ponto interessante na análise dos dados é o comportamento das retas de rugosidade durante o processo de usinagem dos corpos de provas.

Observa-se, nas Figuras 55, 56 e 57, que esta variação é menor para $f = 0,01\text{mm/v}$ quando comparadas ao uso de avanço de corte maior, mas principalmente que para este nível de $f = 0,01\text{mm/v}$ a velocidade de corte maior representa um aumento na vida útil da ferramenta, visto que é possível perceber uma estabilidade da rugosidade final, com pontos até de menor rugosidade ao longo dos passes de usinagem.

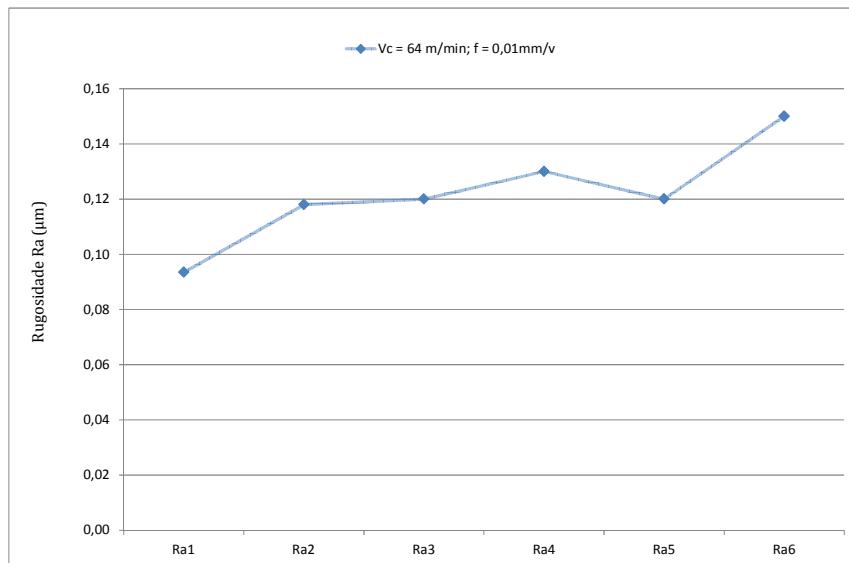


Figura 55 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 64\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$

A utilização de uma rugosidade $R_a > 0,20\mu\text{m}$ como limite de vida útil da ferramenta permite observar que para os testes realizados com $f = 0,01\text{mm/v}$, os únicos pontos acima

desta rugosidade foram percebidos para $V_c = 80\text{m/min}$ conforme pode ser evidenciado pelas Figuras 56 e 57 abaixo.

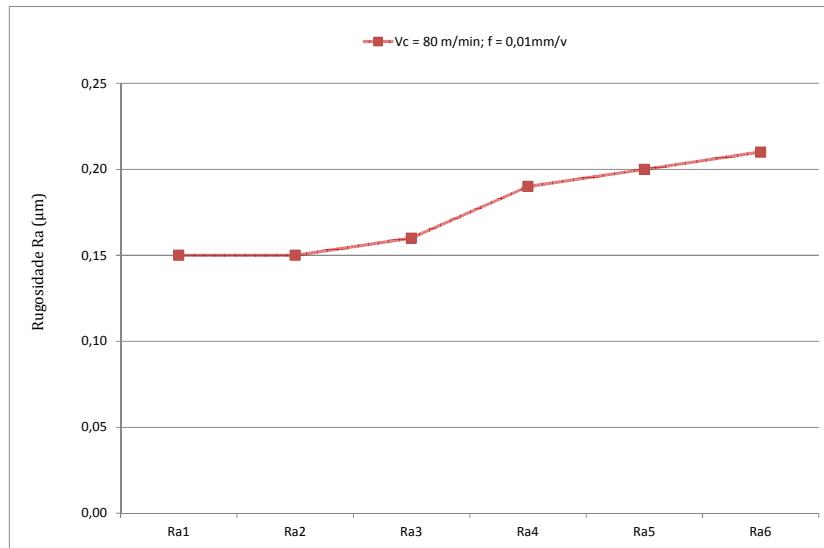


Figura 56 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 80\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$

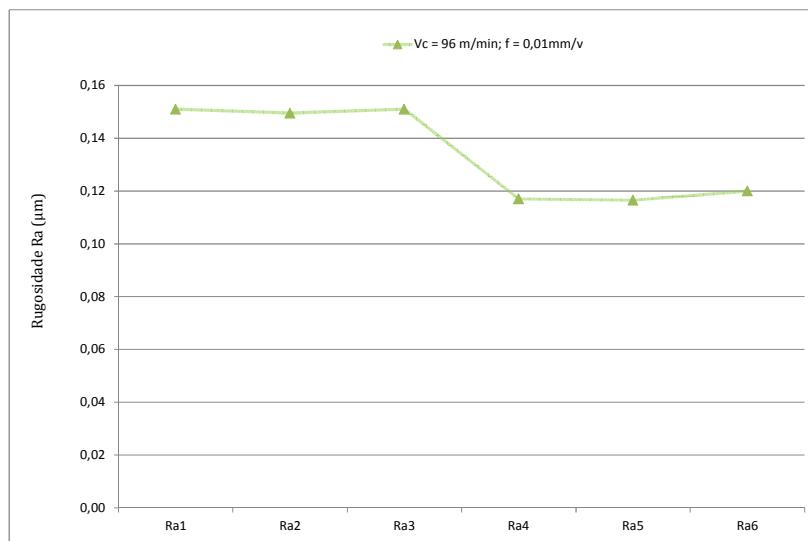


Figura 57 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$

Na Figura 57 é possível identificar que a rugosidade apresentou um resultado melhor na comparação entre o primeiro e o sexto passe considerando a velocidade de corte de 96m/min e um avanço de 0,01mm.

Vale reforçar que estes resultados são válidos para a profundidade de corte constante de 0,05mm conforme já mencionado anteriormente.

Quando comparadas em conjunto, as curvas apresentadas evidenciam esta tendência diferente, o que pode ser observado pela inclinação das retas da Figura 58.

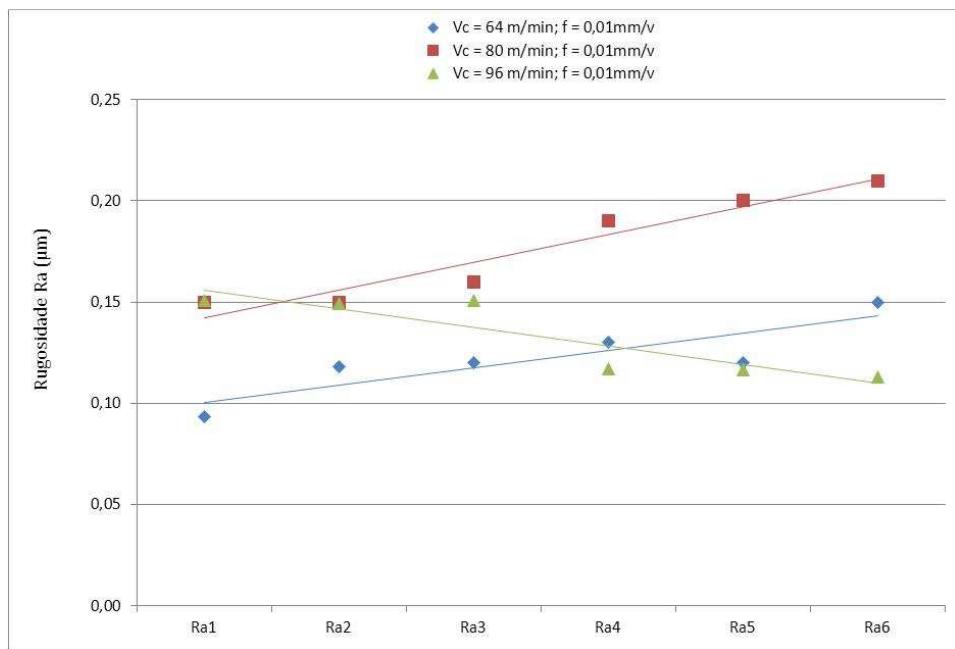


Figura 58 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para avanço (f) de 0,01mm/v

As Figuras 59, 60 e 61 a seguir, apresentam a evolução dos resultados de rugosidade R_a para o parâmetro de corte $f = 0,03\text{mm/v}$.

Conforme pode ser observado pela Figura 60, durante a medição da rugosidade para $V_c = 80\text{m/min}$ e $f = 0,03\text{mm/v}$, a rugosidade ultrapassa o limite de $R_a = 0,20\mu\text{m}$ após o quinto passe de usinagem.

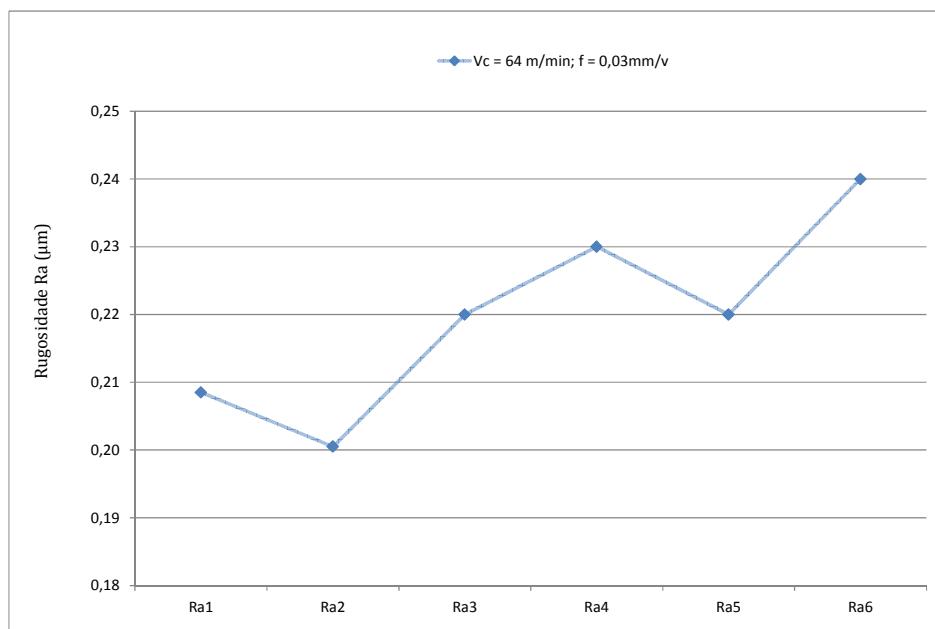


Figura 59 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 64\text{m/min}$ e $f = 0,03\text{mm/v}$

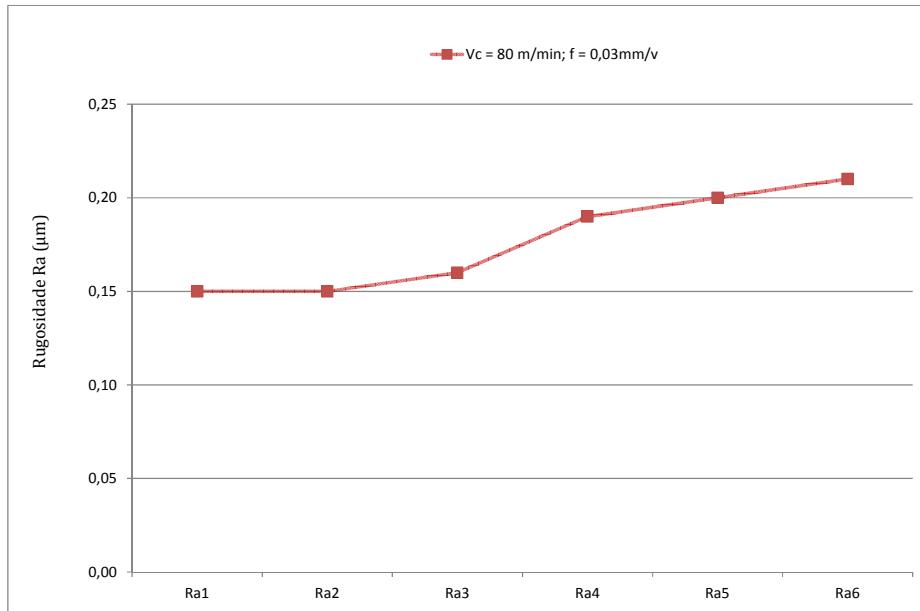


Figura 60 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 80\text{m/min}$ e $f = 0,03\text{mm/v}$

A Figura 61 apresenta os resultados para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,03\text{mm/v}$. É possível observar que a rugosidade está estável acima do limite de $Ra > 0,20\mu\text{m}$.

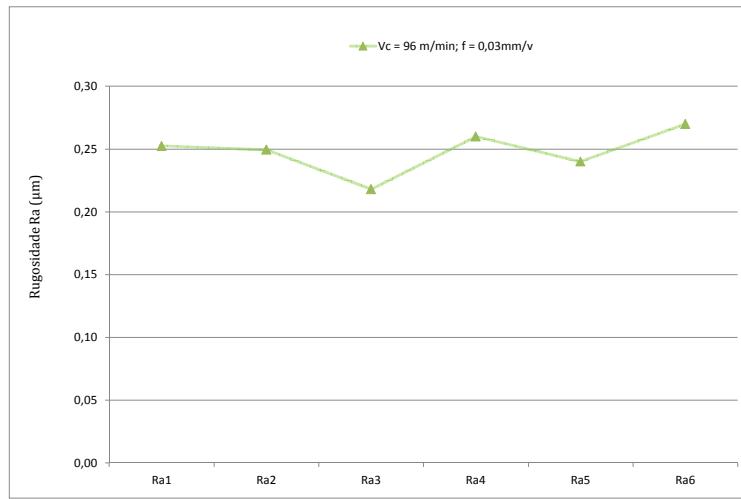


Figura 61 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 96 \text{ m/min}$ e $f = 0,03 \text{ mm/v}$

Quando os parâmetros são comparados em conjunto, conforme (Figura 62), observa-se a diferença de inclinação das retas para distintas velocidades de corte. Ainda é possível observar que variação da rugosidade de saída para os parâmetros de corte com avanço de 0,03mm/v é menor com velocidade de corte maior. Contudo, observa-se que para o critério de qualidade definido para o corpo de prova, rugosidade $Ra < 0,20 \mu\text{m}$, o parâmetro de corte $V_c = 80 \text{ m/min}$ apresentou melhor resultado.

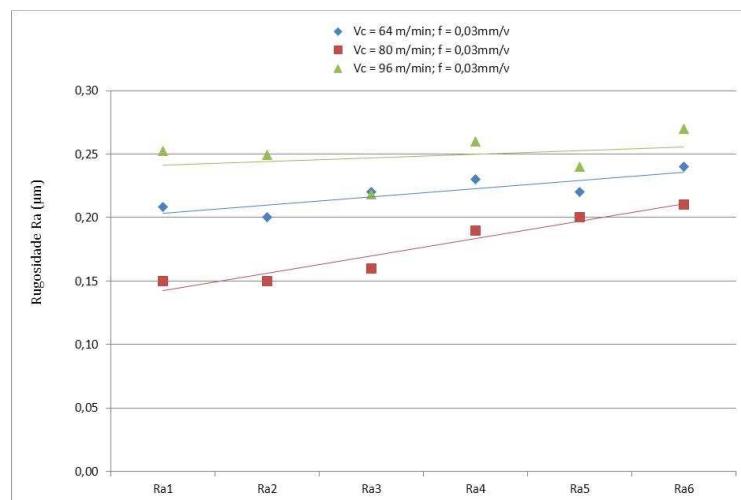


Figura 62 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para avanço de 0,03 mm/v

As Figuras 63, 64 e 65 a seguir, apresentam a evolução dos resultados de rugosidade R_a para o parâmetro de corte $f = 0,06\text{mm/v}$.

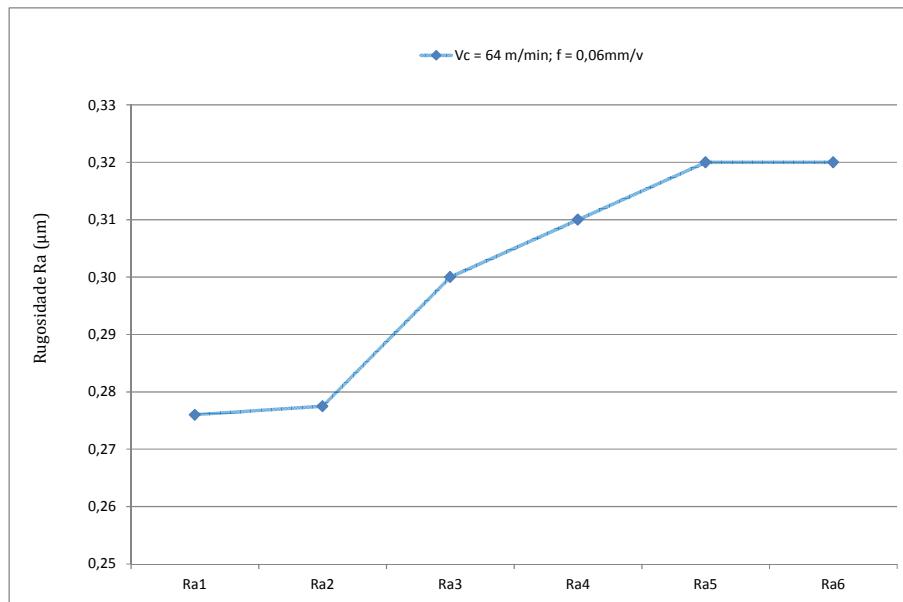


Figura 63 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 64\text{m/min}$ e $f = 0,06\text{mm/v}$

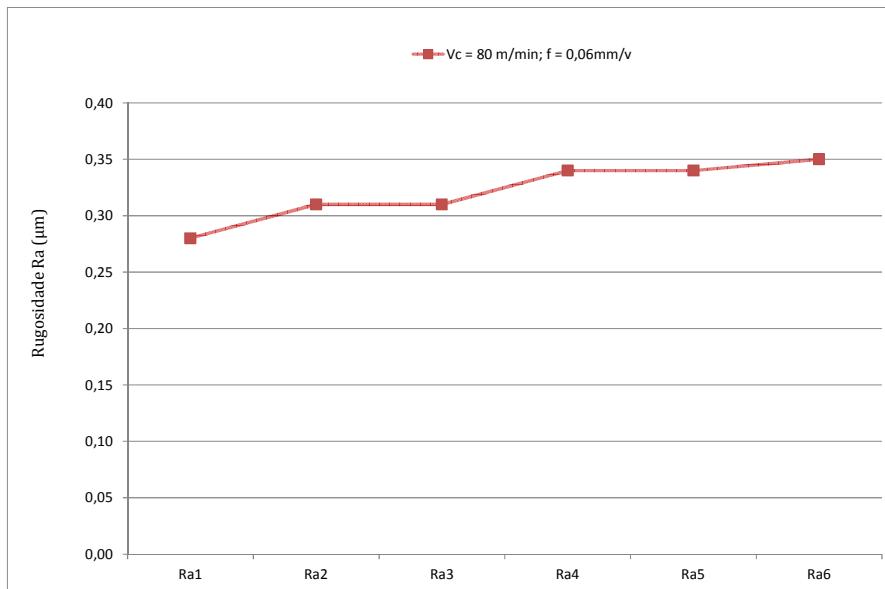


Figura 64 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 80\text{m/min}$ e $f = 0,06\text{mm/v}$

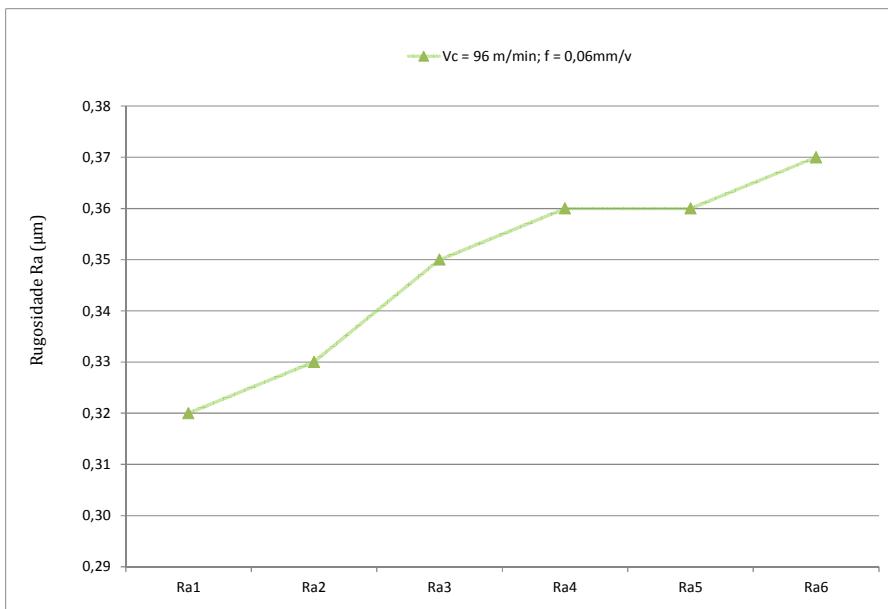


Figura 65 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para $V_c = 96 \text{ m/min}$ e $f = 0,06 \text{ mm/v}$

Quando comparados em conjunto, observa-se uma mesma tendência de aumento de rugosidade a partir da inclinação das curvas abaixo apresentadas pela Figura 66.

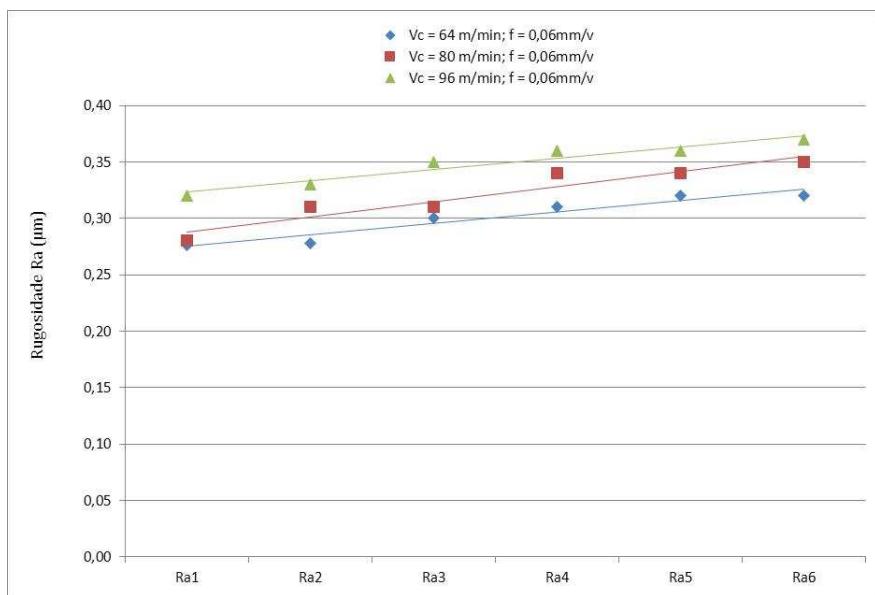


Figura 66 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem para avanço de $0,06 \text{ mm/v}$

Tais resultados devem ser considerados exclusivamente para a usinagem do aço AISI M4 temperados a 64 HRc e usinados com $a_p = 0,05\text{mm}$.

4.2 Circularidade das superfícies usinadas

Os resultados de circularidade foram registrados e monitorados quanto ao seu resultado de circularidade como demonstram as Figura 67 e Tabela 6.

Tabela 6 - Resposta para a circularidade da superfície usinada (μm).

Nr do Ensaio	V_c (m/min)	f (mm/v)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	\bar{C}
1	64	0,01	1.15	1.12	1.15	1.14	1.16	1.13	1.14
2	96	0,01	0.72	0.75	0.74	0.72	0.70	0.73	0.73
3	64	0,06	1.25	1.22	1.24	1.25	1.25	1.27	1.25
4	96	0,06	0.76	0.76	0.73	0.74	0.76	0.75	0.75
5	64	0,03	1.18	1.19	1.18	1.20	1.16	1.17	1.18
6	80	0,01	0.78	0.79	0.78	0.80	0.77	0.78	0.78
7	80	0,06	0.92	0.91	0.90	0.94	0.92	0.92	0.92
8	96	0,03	0.75	0.76	0.75	0.74	0.73	0.77	0.75
9	80	0,03	0.80	0.82	0.82	0.84	0.83	0.84	0.83

Nota-se que não existe uma variação significativa entre os valores de resposta da circularidade ao longo dos passes de usinagem para um mesmo conjunto de parâmetros de corte ou ensaio.

Isso significa também que o desgaste da ferramenta não provoca variações excessivas de circularidade e este está restrinido na verdade por condições operacionais como rigidez do equipamento e tipo de ferramenta aplicada. O conjunto formado pela máquina, ferramenta e dispositivo de fixação tem grande influência na formação de erros das peças torneadas; (Dória, 2005).

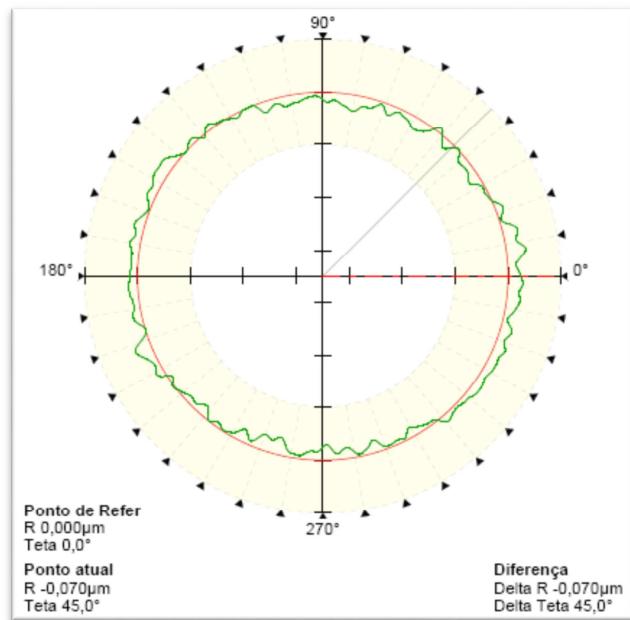


Figura 67 – Circularidade final para $V_c = 96$ m/min e $f = 0,01$ mm/v.

No entanto, observando a Figura 68 é possível identificar que a circularidade de perfil é melhor para uma velocidade de corte mais elevada, sendo que a variação de avanço também representa uma variação da circularidade em proporções menores.

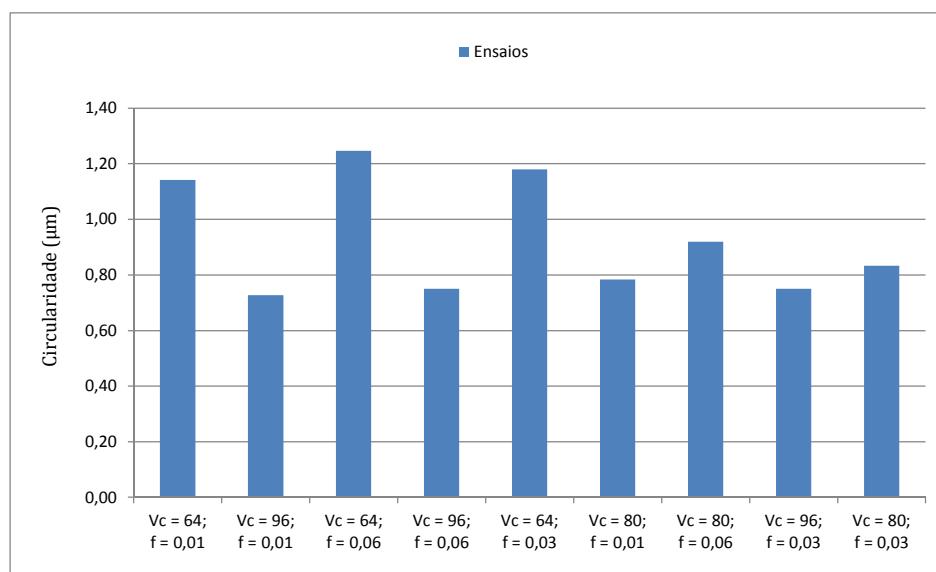


Figura 68 – Circularidade de saída média para cada um dos ensaios e parâmetros de corte.

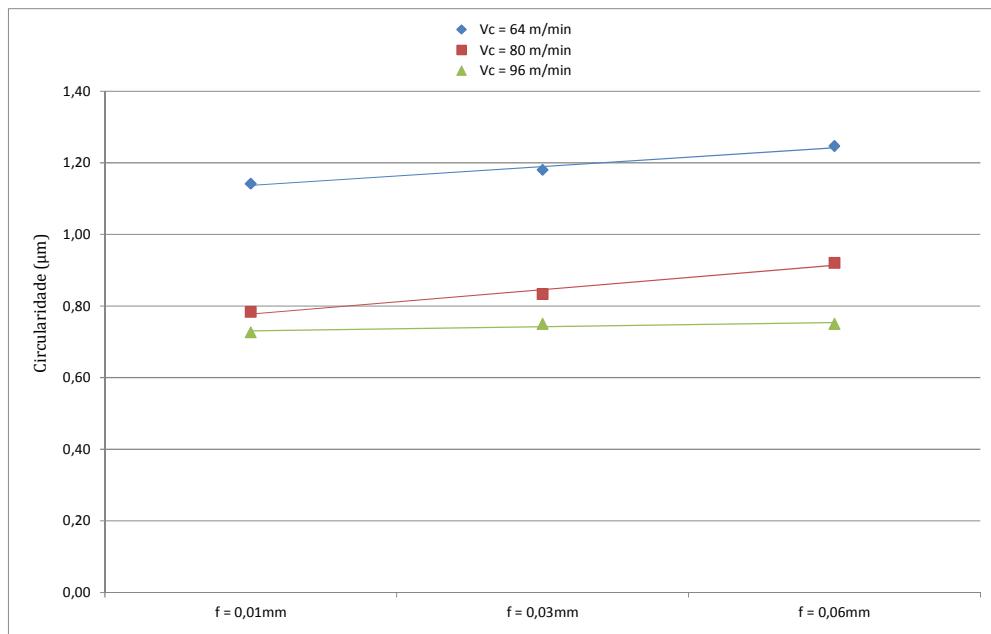


Figura 69 – Influência dos parâmetros na circularidade média para cada um dos ensaios e parâmetros de corte.

A Figura 69 apresenta uma comparação das retas de saída para as diferentes V_c . Uma análise acerca destes resultados permite afirmar que a circularidade apresenta melhor resultado a partir da aplicação de velocidades de corte maiores. Isto provavelmente está relacionado ao fato de que a rugosidade superficial pode interferir na medição de circularidade para este nível de tolerância dimensional, enquanto que há uma tendência de aumento de vibração pelo aumento da velocidade de corte; (Stakhniv, Devin, Petrusha, & Osipov, 2009).

Observa-se na literatura que em materiais com menor dureza, o processo tende a ficar mais e mais estável com o aumento da V_c e consequente redução da vibração do conjunto máquina-suporte-peça; (Ghani & Choudhury, 2002).

Ao comparar a inclinação da reta entre os parâmetros apresentados na Figura 66, observa-se que tal inclinação é menor para $V_c = 96\text{m/min}$ indicando que a circularidade é mais estável, independentemente do avanço escolhido. A Figura 70 mostra a superfície de resposta em 3D para esta variável de saída.

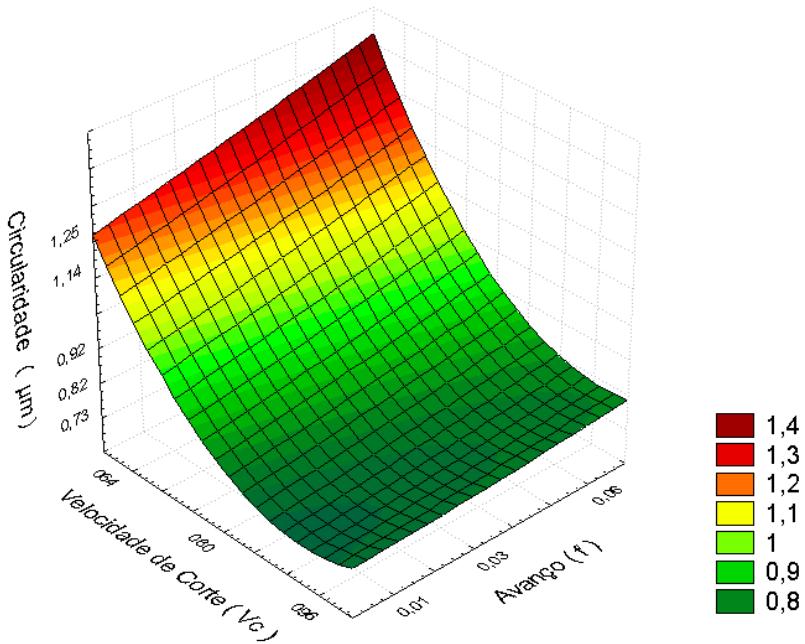


Figura 70 – Superfície de resposta para a Circularidade (C) e influência dos parâmetros da velocidade de corte (V_c) e avanço (f).

Onde a equação de saída para a variável de saída circularidade (C) é:

$$C_{(\mu\text{m})} = 4,9134 - 0,0912V_c + 6,0942f + 0,0005V_c^2 - 0,0576V_cf + 4,4444f^2$$

4.3 Desgaste e avarias na ferramenta de corte

Para todas as condições ensaiadas, não foram verificados desgaste de flanco ou de cratera, bem como nenhuma ocorrência de lascamento. Após a análise destes dados é possível avaliar o nível de influência da variação de cada parâmetro e suas combinações quanto à saída da rugosidade e circularidade do corpo de prova. Não houve evidência de quebra que permitam calcular o tempo de vida das ferramentas utilizadas nos experimentos sendo que o critério de qualidade do corpo de prova foi definido nas premissas deste trabalho para $R_a < 0,20 \mu\text{m}$ e não representa obrigatoriamente um critério de fim de vida da ferramenta.

A Figura 71 mostra a aresta de corte da ferramenta de CBN mista utilizada na usinagem do aço AISI M4, após a superfície do corpo de prova ultrapassar o critério de

qualidade na condição de usinagem de $V_c = 80$ m/min e $f = 0,03$ mm/v. Nota-se a ocorrência do desgaste do revestimento de Nitreto de Titânio, porém, é possível observar um pequeno desgaste de flanco na Figura 72. Tal ocorrência pode ter sido a causa da rugosidade ultrapassar o critério de qualidade definido nas premissas deste trabalho.

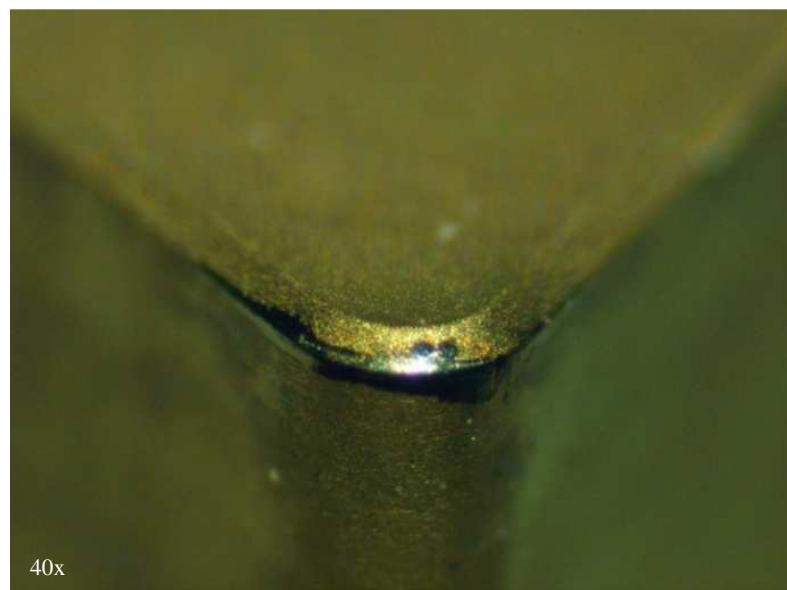


Figura 71 - Desgastes na ferramenta após o corpo de prova atingir rugosidade $R_a > 0,20\mu\text{m}$, para $V_c = 80$ m/min, $f = 0,03$ mm/v e $a_p = 0,05$ mm.



Figura 72 – Detalhe do desgaste de flanco da ferramenta

4.4 Experimentos de comparação sem lubrificação

O exercício de análise dos dados obtidos a partir da usinagem dura trazem resultados satisfatórios quando à usinagem de aço endurecido com o uso da lubrificação como apresentado neste trabalho.

A aplicação do mesmo conceito de análise para um processo de torneamento duro sem o uso de lubrificantes se demonstrou interessante a partir da análise da literatura disponível, as quais apontam para possíveis vantagens deste processo na usinagem e aços temperados com elevada dureza. Tal análise foi efetuada neste trabalho com o objetivo de oferecer um parâmetro de comparação entre os parâmetros que melhor apresentam influência sobre a rugosidade e circularidade final, ou seja, avanço baixo e velocidade de corte alta.

Para tanto, os dados relativos a usinagem sem lubrificação estão apresentados na Tabela 7 e 8 e representam saídas de rugosidade e circularidade para os parâmetros de corte de $f = 0,01\text{mm/v}$, $V_c = 96\text{m/min}$ e $ap = 0,05\text{mm}$, respectivamente.

Tabela 7 - Resposta para a rugosidade R_a na usinagem sem lubrificação.

<i>Nr do Ensaio</i>	<i>Vc (m/min)</i>	<i>f (mm/v)</i>	<i>Ra₁</i>	<i>Ra₂</i>	<i>Ra₃</i>	<i>Ra₄</i>	<i>Ra₅</i>	<i>Ra₆</i>	\bar{R}_a
1'	96	0,01	0.11	0.15	0.16	0.22	0.44	0.56	0.28

A análise dos dados de rugosidade superficial R_a ao longo da usinagem sem lubrificação é apresentada na Figura 73 e demonstra que a rugosidade obtida durante os primeiros passes permite a fabricação de peças abaixo de $0,20\mu\text{m}$. No entanto, a partir da quarta medição do corpo de prova, esta rugosidade ultrapassa este limite e a partir da medição da quinta amostra, o resultado apresenta uma piora significativa ultrapassando mais do que o dobro do critério de qualidade esperado.

Tais resultados foram obtidos a partir do uso da mesma metodologia apresentada no capítulo anterior para a usinagem com lubrificação, mesma ferramenta e equipamentos de torneamento e medição.

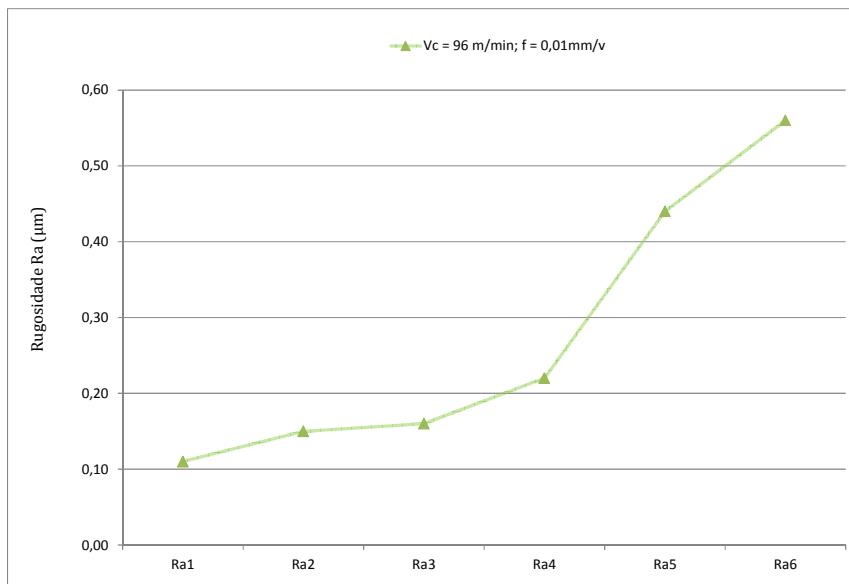


Figura 73 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem sem lubrificação para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$

Na Figura 74 é possível analisar o resultado quanto a rugosidade para os parâmetros de corte mencionados durante o processo de usinagem com e sem lubrificante.

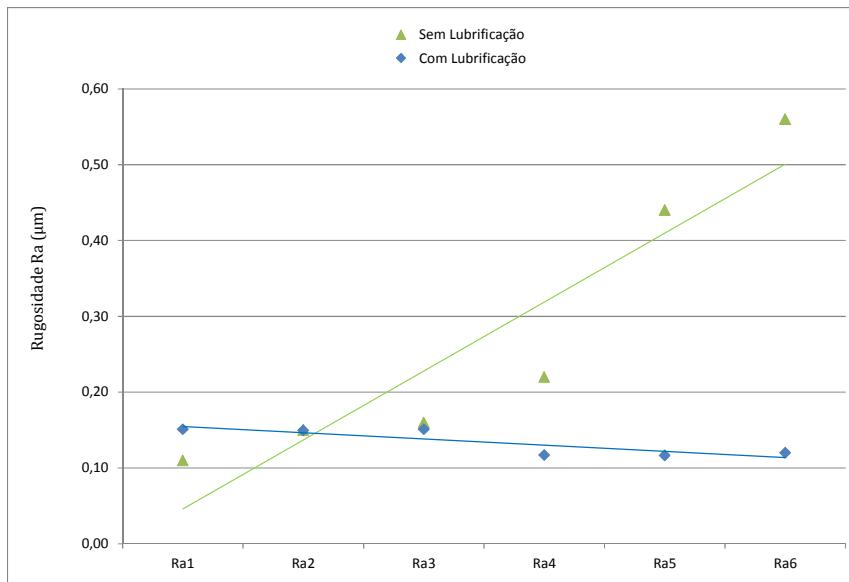


Figura 74 – Comparação entre a rugosidade para os parâmetros de usinagem $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$ ao longo da usinagem com e sem lubrificação

Tais resultados permitem comparação, visto que seguem a mesma metodologia de usinagem, exceto pelo parâmetro de lubrificação, a qual se faz necessária à comparação.

Tabela 8 - Resposta para a circularidade C na usinagem sem lubrificação.

<i>Nr do Ensaio</i>	V_c (m/min)	f (mm/v)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	\bar{C}
1.1	96	0,01	0.75	0.78	0.82	0.92	1.14	1.27	0.95

Tal qual apresentado anteriormente na análise dos dados de rugosidade superficial R_a ao longo da usinagem sem lubrificação, a metodologia apresentada na medição de circularidade segue os mesmos critérios do capítulo anterior e permitem comparações.

A Figura 75 demonstra que a circularidade obtida ao longo da usinagem apresenta uma variação durante os passes de usinagem, no entanto, em escala menor que a variação apresentada pela rugosidade.

A Figura 76 apresenta uma comparação entre a circularidade obtida com e sem lubrificação. Observa-se uma inclinação maior durante o segundo teste, ou seja, sem lubrificação.

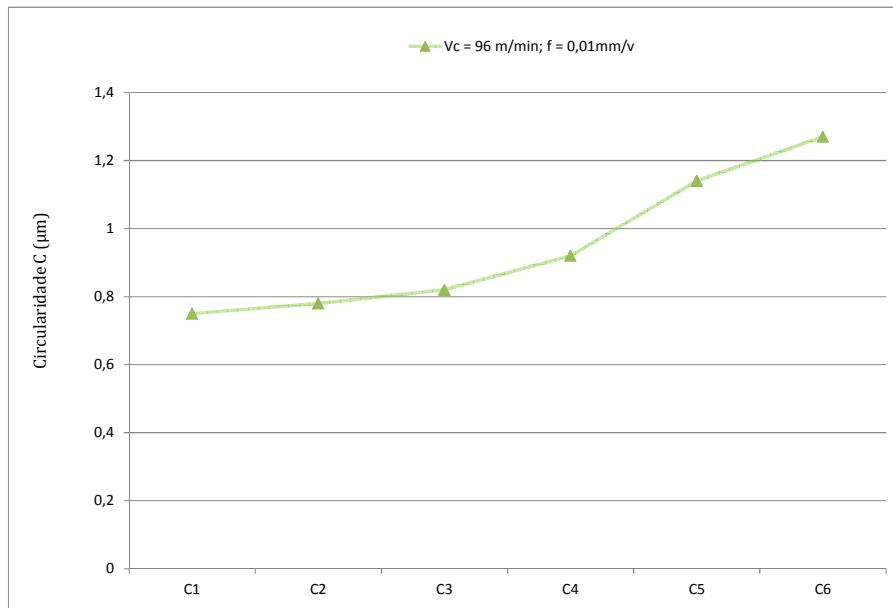


Figura 75 - Rugosidade superficial ao longo da usinagem sem lubrificação para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$

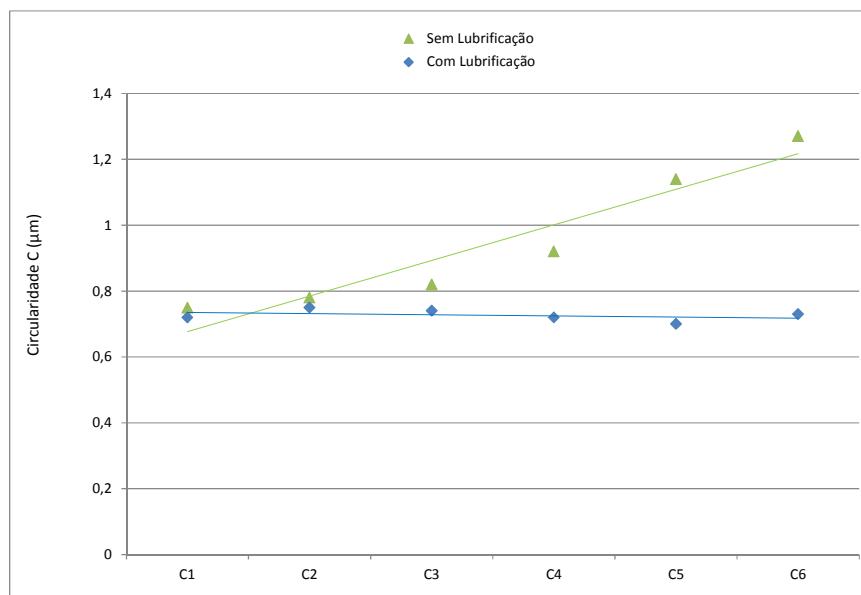


Figura 76 – Comparação entre a circularidade para os parâmetros de usinagem $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$ ao longo da usinagem com e sem lubrificação

Tais resultados de rugosidade e circularidade, quando comparados ao processo de usinagem com lubrificação, devem ser analisados com base na avaliação do desgaste da aresta de corte da ferramenta e não devem ser somente atribuídos a esta variável.

A Figura 77 apresenta uma imagem da aresta de corte utilizada no ensaio sem lubrificante solúvel.

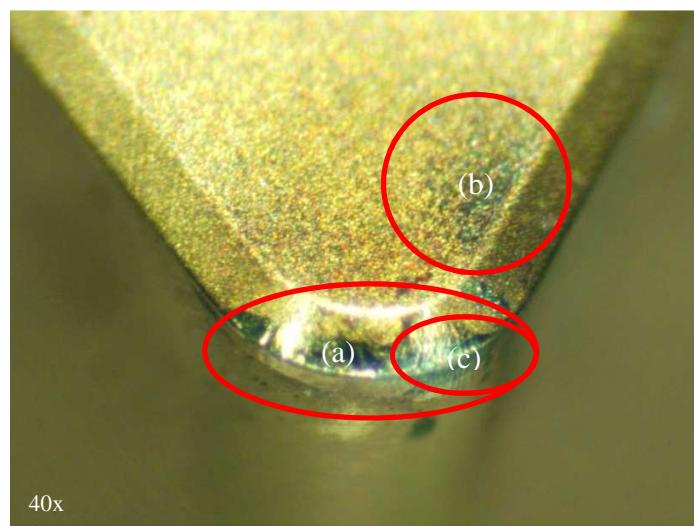


Figura 77 – Desgastes na ferramenta para o teste sem lubrificação e parâmetros de corte de $V_c = 96\text{ m/min}$, $f = 0,01\text{ mm/v}$ e $a_p = 0,05\text{ mm}$.

Tal qual no ensaio anterior, não houve evidência de lascamento na ferramenta, no entanto, percebe-se ao final dos testes um desgaste maior (a) quanto ao desplacamento de TiN para o mesmo número de passes, como pode ser observado pelas Figuras 78 e 79. Tal desgaste ocorreu de forma sucessiva na medida em que o corpo de prova foi sendo usinado sem lubrificação e provavelmente contribuiu para a oscilação dos valores de rugosidade e circularidade final.

Atribui-se também a esta variação de rugosidade o aparecimento de pequenos riscos no flanco da ferramenta (c), o qual não estava sob ação do lubrificante, como apresentado durante o trabalho.



Figura 78 - Desgastes da ferramenta COM Lubrificação para $V_c = 96$ m/min, $f = 0,01$ mm/v e $a_p = 0,05$ mm.

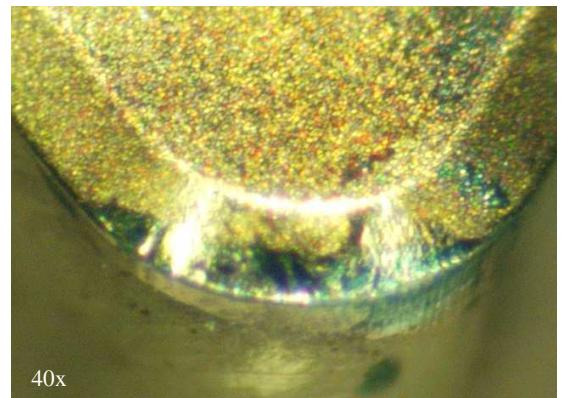


Figura 79 - Desgastes da ferramenta SEM Lubrificação para $V_c = 96$ m/min, $f = 0,01$ mm/v e $a_p = 0,05$ mm.

Tais situações de desgaste, tanto no flanco da ferramenta quanto no revestimento de TiN, favorece o aparecimento de microtrincas no material base de CBN e implicam na piora da rugosidade superficial e circularidade.

Capítulo 5

5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

A partir dos estudos apresentados no presente trabalho, pode-se concluir:

- para o parâmetro de corte de avanço (f) de 0,01 mm/v, foi possível obter valores de rugosidade média abaixo de 0,20 μm para todas as velocidades de corte estudadas e a rugosidade de saída não ultrapassou o critério de qualidade estipulado para o corpo de prova ($R_a < 0,20 \mu\text{m}$) para o número de ensaios realizado.
- para os fatores analisados neste trabalho, a influência exercida sobre a rugosidade final pelo avanço de corte foi maior do que a influência observada pela velocidade de corte. As interações entre estes dois parâmetros permitiu a obtenção de rugosidades superficiais abaixo de 0,20 μm para quase todos os ensaios realizados, no entanto, o desgaste da ferramenta reduz a qualidade do acabamento superficial ao longo do processo, sendo a vida da ferramenta um critério importante;
- observa-se uma tendência de manutenção da circularidade ao longo dos passes de usinagem com lubrificação para todos os parâmetros de corte; No entanto, os melhores resultados foram obtidos a partir do uso de velocidades de corte maiores;

- a aplicação da usinagem sem lubrificação para $V_c = 96\text{m/min}$ e $f = 0,01\text{mm/v}$ gerou uma saída de rugosidade dentro dos parâmetros de qualidade esperados, no entanto, com maior variação do resultado ao longo dos passes de torneamento, quando comparados aos ensaios realizados com o uso do óleo solúvel, sendo menos indicada neste caso.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- realizar um projeto de experimento (DOE) similar ao deste trabalho, utilizando ferramentas de CBN para verificar o seu comportamento quanto à vida da ferramenta com maiores passes até que haja evidências de lascamento;
- estudar a influência da variação do parâmetro de profundidade de corte, no torneamento do aço AISI M4 com dureza de 64 HRC, utilizando-se o projeto de experimentos;
- avaliar as saídas de rugosidade e circularidade na usinagem sem lubrificação para os demais parâmetros de corte ensaiados e comparar os resultados quanto ao processo com óleo solúvel;
- realizar ensaios comparativos entre os processos de torneamento duro do aço AISI M4 e o processo de retificação do mesmo aço e sua viabilidade econômica.

Referências Bibliográficas

- Abhang, L. B. (2012). Response Surface Modeling and Grey relational Analysis to Optimize Turning Parameters with Multiple Performance Characteristics. *12 International Journal of Manufacturing, Materials and Mechanical Engineering*, 2, 12-45.
- Balzers, O. (09 de Julho de 2012). www.oerlikonbalzers.com.br. Fonte: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bbr/por/01-products-services/02-balinit-coatings/02-balinit-a/indexW3DnavidW261.php>
- Bitterlich, B., Bitsch, S., & Friederich, K. (2008). *SialON based ceramic cutting tools*. Jornal of the European Ceramic Society 28.
- Bohler. (12 de Outubro de 2011). www.bohler-brasil.com.br.
- Cervelin, J. E. (2009). Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento. *Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação e Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos de Manufatura Avançada*, p. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Chavoshi, S. Z., & Tajdari, M. (2010). Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool. *International J. Mater Form*, pp. 233-239.
- Chen, W. (2000). Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 455-466.
- Chou, Y. (2003). Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. *Wear* 255, p. 1388–1394.
- Chou, Y., Evans, C., & Brarash, M. (2002). Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel. *Jornal of Material Processing Technology*, 124, 274-283.
- Denkena, K. M. (2012). Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces and cutting temperature. *German Academic Society for Production Engineering*.
- Dilbag, S., & Rao, P. V. (2008). Performance improvement of hard turning with solid lubricants. *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 38:529–535.
- Diniz, A. E., & Micaroni, R. (2007). *Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, N. L. (2008). *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: 6^a ed., Artliber Editora Ltda, São Paulo, 244p.
- Diniz, A., & Matsumoto, H. (1999). Análise da vida das ferramentas no torneamento de aços endurecidos. *XV COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Águas de Lindóia – SP.

- Diniz, A., & Oliveira, A. (2008). Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. *Jurnal of Materials Processing Technology*, 275-281.
- Diniz, A., Gomes, D., & Braghini, A. (2005). Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Jurnal of Materials Processing Technology*, 240-248.
- Dogra, M., Sharma, V. S., Sachdeva, A., Suri, N. M., & Dureja, J. S. (2010). Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN Hard Turning: A review. *International Jurnal of Precision Engineering and Manufacturing*, pp. 341-358.
- Dória, M. A. (2005). Análise da Influência da Rigidez do Sistema nos Erros Dimensionais e Geométricos no Processo de Torneamento. *Dissertação de Mestrado*, pp. Ilha Solteira, SP.
- Farias, A. d. (2009). Análise da Tensão Residual e Integridade Superficial no Processo de Torneamento em Material Endurecido do Aço ABNT 8620 Cementado. *Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*.
- Fnides, B., Yallese, M., Mabrouki, T., & Rigal, J. (2011). Application of response surface methodology for determining cutting forces model in turning hardened AISI H11 hot work tool steel. *Indian Academy of Sciences, Sadhana*, Vol.36 Part 1.
- Friedrich, E. B. (2008). Análise do Desgaste em Ferramentas Revestidas e do Acabamento no Torneamento do Ferro Fundido. *Dissertação de Mestrado - Centro Federal de Educação Tecnologica Celso Suckow da Fonseca*.
- Ghani, A., & Choudhury, I. (2002). Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. *Journal of Materials Processing Technology* 127, p. 17-22.
- Gonçalves, A. (2009). Usinabilidade do carbeto de tungstênio no torneamento com ferramenta de diamante. *Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*.
- Huang, Y., Chou, Y. K., & Liang, S. Y. (2007). CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses. *International Jurnal of Advanced Manufature Technology*, 35:443-453.
- Júnior, A. R. (2010). Otimização de múltiplos duais correlacionados no processo de torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá*.
- Köche, J. C. (2012). *Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa*. Petrópolis, RJ: Vozes.
- Kress, D. (Setembro de 2001). A usinagem de materiais endurecidos elimina a retificação, Máquinas e Metais. *Máquinas e Metais*, pp. p. 18-23.

- Lima, A. (2008). Análise dos Efeitos Gerados Pelos Parâmetros de Corte em Processos de Usinagem Sobre a Integridade Superficial das Peças em Aço ABNT 4340. *Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.*
- Lipatov, A. A. (2008). Instability of Chip Formation and the Wear of a Hard-Alloy Tool in Cutting Austenitic Steel. *ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, Vol. 28, No. 9, pp. pp. 904–905.*
- Malère, E. (2006). Análise Comparativa de Ferramentas Cerâmicas na Usinagem de Ferros Fundidos e Aços Endurecidos. *Dissertação de Mestrado*, pp. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.
- Matsumoto, H. (1998). Uma contribuição ao estudo do processo de torneamento de aços endurecidos. *Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas*, 148 p.
- Momper, F. J. (Março de 2000). Usinagem a seco e de materiais endurecidos. *Máquinas e Metais*, pp. p. 30-37.
- Nascimento, C. H. (2011). Estudo da Distribuição da Temperatura na Região de Formação de Cavacos usando Método dos Elementos Finitos. *Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação e Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos de Manufatura Avançada*, p. São Carlos.
- NBR_6175. (1979). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Processos mecânicos de usinagem: Norma NBR 6175.*
- Oliveira, A. J., Diniz, A. E., & Ursolino, D. J. (2009). Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. *Jurnal of Materials Processing Technology 209*, pp. 5262-5270.
- Outeiro, J., Pina, J., M'Saoubi, R., Pusavec, F., & Jawahir, I. (2008). Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology 57*, pp. 77–80.
- Pereira, J. (2006). *Estudo das condições de corte no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos (DOE)*. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, Dissertação de Mestrado.
- Qiang, X., Bijlaard, F., & Kolstein, H. (2012). *Dependence of mechanical properties of high strength steel S690 on elevated temperatures*. Construction and Building Materials.
- Remadna, M., & Rigal, J. F. (2006). Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology 178*, p. 67–75.

- Rosário, J. F. (2011). Estudo da integridade superficial e seu efeito na fadiga de contato de um aço ferramenta. *Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica*.
- Sahin, Y., & Motorcu, A. R. (2012). Emerald Article: The Development of Surface Roughness Model When Turning Hardened Steel with Ceramic Cutting Tool Using Response Methodology. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, Vol. 4 Iss: 3*, pp. 291 - 304.
- Sales, G. T. (2004). Torneamento do aço ASTM 300M endurecido com ferramentas de cerâmica e PCBN com geometria “Wiper”. *Dissertação de mestrado, Itajubá, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI*, 117 p.
- Sandvik. (12 de Julho de 2012). Fonte: www.sandvik.coromant.com.br.
- Santos, M. R. (2008). *Modelo térmico para a solução de problemas inversos em transferência de calor com aplicação de um processo de usinagem por torneamento*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- Scandiffio, I. (2000). Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço. *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas*, Campinas, SP.
- Sethi, D., & Kumar, V. (2012). *Modeling of tool wear in turning En31 alloy steel using coated carbide inserts*. 34 International Journal of Manufacturing, Materials and Mechanical Engineering. 34-51.
- Souza, J., Nono, M., Ribeiro, M., Machado, J., & Silva, O. (2008). Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. *Material and Design Jornal*.
- Stakhniv, N. E., & Devin, L. N. (2011). *Journal of Superhard Materials, Vol. 33, No. 2*, pp. 129–136.
- Stakhniv, N. E., Devin, L. N., Petrusha, I. A., & Osipov, A. S. (2009). Dynamic Phenomena in Finish Turning of Hardened Steels with CBN-Based Tools. pp. pp. 196–202.
- Thakur, D., Ramamoorthy, B., & Vijayaraghavan, L. (2009). Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. *Materials and Design 30*, pp. 1718–1725.
- Valdés, C. E. (2008). *Avaliação através da inspeção magnética da condição superficial de anéis de rolamento de aço DIN 100Cr6 após torneamento duro a seco*. São Paulo: Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- Vogl, F. W. (2007). Estudo do comportamento da liga AA7050-T74 em operações de usinagem por torneamento. *Dissertação de Mestrado, Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica.*
- Werkema, M. C. (1996). Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo. *MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG*, Belo Horizonte.
- Yallese, M., Chaoui, K., Keghib, N., Boulanouar, L., & Rigal, J. (2009). Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Jornal of Materials Processing Technology*, 1092-1104.
- Zhang, Z., Yan, J., & Kuriyagawa, T. (2011). Study on tool wear characteristics in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide. *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 57:117–125.