

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

ELIÉZER REIS TEIXEIRA
DIEGO AP. AMARANTE GOMES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO E
REFRIGERAÇÃO NA USINAGEM DO AÇO SAE 1045**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

ELIÉZER REIS TEIXEIRA
DIEGO AP. AMARANTE GOMES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO E
REFRIGERAÇÃO NA USINAGEM DO AÇO SAE 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

Análise da influência das condições de lubrificação e refrigeração na usinagem do aço SAE 1045

Por

Eliézer Reis Teixeira

Diego Ap. Amarante Gomes

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19:30 h do dia 26 de novembro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

.....

Prof^a. Dr^a Janaina Fracaro de Souza
Gonçalves (UTFPR - Orientadora)

Prof^a. Me. Emillyn Ferreira Trevisani Olivio
(UTFPR - Examinadora)

Prof. Dr. Carlos Elias Da Silva Junior
(UTFPR - Examinador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade que nos concede de buscar novos conhecimentos.

A nossa orientadora Prof.^a Dra. Janaina, pela motivação, orientação, amizade, paciência e pelas importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho e para nossa experiência acadêmica e profissional.

O grande reconhecimento à nossa família que acreditamos que sem o apoio deles seria muito difícil vencer essa etapa de nossas vidas.

Ao técnico de laboratório de Processos de fabricação Wanderlei Malaquias pela excelente colaboração e auxílio durante todo o período de trabalho para realização dos ensaios.

Ao prof. Genésio Lopes da Silva pelo auxílio didático e por ceder a utilização do torno durante horários de suas aulas.

Aos colegas que estivemos juntos durante a realização deste trabalho no laboratório de materiais e ensaios William Sagrado e prof. Me. Fernando de Medeiros Diorio.

A todos os colegas de classe a nossa satisfação de poder conviver juntos durante a realização deste trabalho e do curso.

A todos que, embora não estão presentes entre essas palavras, mas de uma forma ou de outra, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma
(LAVOISIER, Antoine-Laurent de).

RESUMO

TEIXEIRA, Eliézer Reis; GOMES, Diego Ap. Amarante. Análise da influência das condições de lubrificação e refrigeração na usinagem do aço SAE 1045. 2014. 150f. Trabalho de conclusão de curso. (Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Pesquisas em usinagem a seco e mínima quantidade de lubrificante (MQL) tem se intensificado muito nos últimos anos. As vantagens operacionais, econômicas, legais, ambientais e à saúde dos operadores, proporcionadas por essas técnicas de usinagem são os fatores de incentivo para que sejam pesquisados esses assuntos. Este trabalho mostra a influência da utilização de três meios de lubrificação/refrigeração, a usinagem a seco, jorro de fluido abundante e MQL. O material usinado foi o aço SAE 1045. Os processos de fabricação utilizados foram o torneamento e rosqueamento. No torneamento foram variados alguns parâmetros de corte, a velocidade de corte em três níveis e o avanço em dois níveis. A quantidade de ensaios foi determinada a partir do planejamento experimental fatorial considerando três fatores, meio lubri-refrigerante, velocidade de corte e avanço por revolução. O estudo verificou por meio das variáveis de saída, rugosidade superficial, desvios geométricos, desgaste e avaria das ferramentas e formação dos cavacos qual meio de lubrificação/refrigeração resultou em melhor usinabilidade para o aço em estudo. A MQL mostrou os melhores resultados de uma forma geral, a usinagem a seco foi boa para o acabamento superficial e o jorro de fluido abundante trouxe condições favoráveis à formação do cavaco.

Palavras-chaves: Meio de lubrificação/refrigeração, velocidade de corte, avanço por revolução, usinabilidade.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Eliezer Reis; GOMES, Diego Ap. Amarante. Analysis of the influence of the conditions of lubrication and cooling machining of steel SAE 1045. 2014. 150 f. 2014. Completion of course work. (Course Technology in Industrial Maintenance) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Research in dry machining and minimum quantity of lubricant (MQL) has intensified in recent years, operational, economic, legal, environmental and health of operators benefits, provided by these machining techniques are the factors encouraging. This work shows the influence of using three means of lubricating / cooling, dry machining, abundant gush of fluid and MQL. The machined material was steel SAE 1045. Manufacturing processes used were the turning and screwing. In turning some cutting parameters were varied, the cutting speed on three levels and advance on two levels. The number of trials was determined from the factorial experimental design considering three factors, means lubrication and coolant, cutting speed and advance per revolution. The study explored through the output variables, surface roughness, geometric deviations, wear and damage to tools and chip formation which means lubricating / cooling resulted in better machinability for steel under study. The MQL showed the best results in general, dry machining was good for the surface finish and the abundant gush of fluid brought favorable conditions for the formation of the chip.

Keywords: Means lubricating/cooling, cutting speed, advance per revolution, machinability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação	25
Figura 2 - Parâmetros de corte, superfícies em torneamento e forças de corte	27
Figura 3 - Dimensões e elementos de uma rosca	29
Figura 4 - Dimensões do filete.....	29
Figura 5 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.....	30
Figura 6 - Planos do sistema de referência de uma ferramenta de torneiar	32
Figura 7 - Ângulos de uma ferramenta de torneiar.....	33
Figura 8 - Formação do cavaco no Corte Ortogonal	35
Figura 9 - Tipos de cavacos	36
Figura 10 - Formas de cavacos.....	37
Figura 11 - Avarias da ferramenta de corte	39
Figura 12 - Aresta postiça de corte	40
Figura 13 - Tipos de desgastes da ferramenta de corte.....	41
Figura 14 - Medição do desgaste em ferramentas de usinagem.....	43
Figura 15 - Direções de aplicação do fluido de corte	47
Figura 16 - Variáveis que exercem influência na tolerância de peças fabricadas por usinagem.....	51
Figura 17 - Representação do desvio de circularidade	52
Figura 18 - Paralelismo entre duas retas	53
Figura 19 - Percurso de apalpamento, medição, amostragem, inicial e final	54
Figura 20 - Rugosidade média	55
Figura 21 - Altura máxima Rz.....	56
Figura 22 - Sequência das etapas deste trabalho	58
Figura 23 - Representação das dimensões da rosca em milímetros.....	59
Figura 24 - Desenhos com as dimensões teóricas dos corpos de prova antes e depois da realização dos ensaios.....	62
Figura 25 - Ferramenta de corte utilizada com a indicação das dimensões.....	63

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Torno mecânico convencional da oficina mecânica da UTFPR	63
Fotografia 2 - Ferramentas de corte utilizadas no rosqueamento	64
Fotografia 3 - Adaptação do sistema MQL e os componentes utilizados	65
Fotografia 4 - Ajustagem da vazão do MQL observando as borrifadas na folha	66
Fotografia 5 - Estimativa da vazão pelo peso do fluido	67
Fotografia 6 - (a) Adaptação do drive no suporte do relógio comparador, (b) Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.....	68
Fotografia 7 - Equipamentos para fotografar o desgaste da ferramenta: (a) microscópio, (b) suportes.....	69
Fotografia 8 - Fotografia de desgaste de franco da feramente de corte de tornear (205 x).....	69
Fotografia 9 - Instrumentos de medição dos desvios: (a) relógio comparador (b) Micrômetro	70
Fotografia 10 - Durômetro Pantec modelo RBS-M.....	71
Fotografia 11 - Medidor de perfil Pantec	72
Fotografia 12 - Cavacos obtidos no torneamento nos três meios lubri-refrigerante ..	74
Fotografia 13 - Cavacos do rosqueamento nos diferentes meios de lubrificação/refrigeração.....	78
Fotografia 14 - Detalhes do desgaste e avaria da primeira aresta da ferramenta de corte de tornear para o teste sem lubrificação.....	82
Fotografia 15 - Detalhes do desgaste da segunda aresta da ferramenta de corte de tornear para o teste sem lubrificação.....	82
Fotografia 16 - Ferramenta nova com imperfeição e lascamento da aresta de corte	83
Fotografia 17 - Desgastes e avarias das ferramentas utilizadas no torneamento com jorro de fluido abundante.....	85
Fotografia 18 - Arestas novas utilizadas no torneamento com jorro de fluido abundante.....	86
Fotografia 19 - Detalhes do desgaste da ferramenta utilizada no torneamento com MQL.....	88
Fotografia 20 - Detalhes do desgaste e avarias das ferramentas de corte	89
Fotografia 21 - Detalhes do desgaste da ferramenta de rosqueamento	93
Fotografia 22 - Vista lateral da ferramenta de rosqueamento com detalhe da deformação plástica com uso de fluido abundante.....	94
Fotografia 23 - Detalhes das roscas obtidas nos três meios de lubri-refrigeração ..	123

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Desgaste da ferramenta de corte e barra de desvio padrão para os ensaios sem uso de meio lubrificante/refrigerante.....	81
Gráfico 2 - Desgaste da ferramenta de corte e barra de desvio padrão para os ensaios realizados com jorro de fluido abundante.....	84
Gráfico 3 - Desgaste individual para cada parâmetro da ferramenta de corte e barra de desvio padrão para os ensaios realizados com MQL.....	87
Gráfico 4 - Desgaste de flanco da aresta de corte nos meios de lubrificação/refrigeração no torneamento.....	88
Gráfico 5 - Média entre as repetições do desgaste de flanco da.....	92
Gráfico 6 - Desgaste da ferramenta de rosqueamento ao final das repetições.....	92
Gráfico 7- Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco.....	96
Gráfico 8 - Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando jorro de fluido abundante.....	96
Gráfico 9 - Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios com MQL.....	97
Gráfico 10 - Comparação do desvio dimensional obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração.....	98
Gráfico 11 - Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios de rosqueamento nos três meios de lubrificação/refrigeração.....	100
Gráfico 12 - Comparação do desvio dimensional no rosqueamento e torneamento.....	101
Gráfico 13 - Desvio médio de circularidade e barra de desvio padrão para os ensaios de torneamento realizados a seco.....	103
Gráfico 14 - Circularidade média e barra de desvio padrão para os ensaios de torneamento realizados com fluido abundante.....	103
Gráfico 15 - Circularidade média e barra de desvio padrão para os ensaios realizados com MQL.....	104
Gráfico 16 - Comparação dos desvios de circularidade obtidos nos três métodos de lubrificação/refrigeração.....	106
Gráfico 17- Paralelismo médio e barra de desvio padrão para cada um dos ensaios usinando a seco.....	107
Gráfico 18 - Paralelismo médio e barra de desvio padrão para cada um dos ensaios usinando com fluido abundante.....	108
Gráfico 19 - Paralelismo médio e barra de desvio padrão para cada um dos ensaios usinando com MQL.....	108
Gráfico 20 - Comparação do paralelismo obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração.....	109
Gráfico 21 - Rugosidade Ra e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco.....	111
Gráfico 22 - Rugosidade Ra e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando fluido abundante.....	111
Gráfico 23 - Rugosidade Ra e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando MQL.....	112
Gráfico 24 - Comparação da rugosidade Ra obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração.....	114

Gráfico 25 - Rugosidade Rq e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco.....	116
Gráfico 26 - Rugosidade Rq e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando fluido abundante.....	116
Gráfico 27 - Rugosidade Rq e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando MQL.....	117
Gráfico 28 - Comparação da rugosidade Rq obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração.....	118
Gráfico 29 - Rugosidade Rz e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco.....	119
Gráfico 30 - Rugosidade Rz e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem com fluido abundante.....	120
Gráfico 31 - Rugosidade Rz e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem com MQL.....	120
Gráfico 32 - Comparação da rugosidade Rz obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração.....	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Combinação dos ensaios do torneamento	60
Quadro 2 - Combinação dos ensaios do rosqueamento	61
Quadro 3 - Composição química do aço SAE 1045	61
Quadro 4 - Classificação dos cavacos no torneamento	76
Quadro 5 - Classificação dos cavacos no rosqueamento	79
Quadro 6 - Resultado da usinabilidade para cada meio de lubrificação/refrigeração em cada fator resposta analisado.....	126
Quadro 7 - Tempo das amostras para cálculo da vazão no sistema jorro abundante	134
Quadro 8 - Massa do conjunto Becker- estopa-fluido para cálculo da vazão no sistema MQL	135
Quadro 9 - Codificação dos ensaios de torneamento	136
Quadro 10 - Codificação dos ensaios de roscamento.....	136
Quadro 11 - Desvio de circularidade dos ensaios 1 ao 9 no torneamento	137
Quadro 12 - Desvio de circularidade dos ensaios 10 ao 18 no torneamento	138
Quadro 13 - Desvio de paralelismo dos ensaios 1 ao 9 no torneamento	139
Quadro 14 - Desvio de paralelismo dos ensaios 10 ao 18 no torneamento	140
Quadro 15 - Desvio dimensional no torneamento	141
Quadro 16 - Desvio dimensional no roscamento.....	142
Quadro 17 - Rugosidade Ra dos ensaios 1 ao 9 no torneamento.....	143
Quadro 18 - Rugosidade Ra dos ensaios 10 ao 18 no torneamento.....	144
Quadro 19 - Rugosidade Rq dos ensaios 1 ao 9 no torneamento.....	145
Quadro 20 - Rugosidade Rq dos ensaios 10 ao 18 no torneamento.....	146
Quadro 21 - Rugosidade Rz dos ensaios 1 ao 9 no torneamento	147
Quadro 22 - Rugosidade Rz dos ensaios 10 ao 18 no torneamento.....	148
Quadro 23 - Desgaste de flanco da ferramenta de corte do torneamento	149
Quadro 24 - Desgaste de flanco da ferramenta de corte do roscamento	150

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
HRB	Dureza Rockwell B
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (placa de fibra de média densidade)
MFDP	Sistema Máquina/Ferramenta/Dispositivos de Fixação/Peça
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
NBR	Norma Brasileira
<i>I. U</i>	Índice de usinabilidade
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotivos)

LISTA DE ABREVIATURAS

A.C	Antes de Cristo
Art.	Artigo
C	Carbono
Fe	Ferro
g	Gramas
g/ml	Gramas por mililitros
KW	Quilowatts
L/h	Litros por hora
m/mim	Metros por minutos
min	Minutos
ml	Mililitros
ml/h	Mililitros por hora
ml/min	Mililitros por minuto
mm	Milímetros
mm/rev	Milímetros por revolução
Mn	Manganês
P	Fosforo
rpm	Rotação por minuto
S	Enxofre
s	Segundos
Séc.	Século
W	Watts

LISTA DE SÍMBOLOS

P'_s	Plano de corte secundário
d'_1	Diâmetro interior do parafuso
d'_2	Diâmetro médio do parafuso
d_1	Diâmetro interior da porca
d_2	Diâmetro médio da porca
h_1	Profundidade da rosca
A'_α	Superfície secundária de folga
A_α	Superfície principal de folga
A_γ	Superfície de saída da ferramenta de corte
K_T	Desgaste de cratera
P_f	Plano admitido de trabalho
P_o	Plano ortogonal
P_r	Plano de referencia da ferramenta
P_s	Plano de corte principal
VB_B	Desgaste de flanco médio
VB_{Bmax}	Desgaste de flanco máximo
V_{c20}	Velocidade de corte para uma vida da ferramenta de 20 minutos
V_{c60}	Velocidade de corte para uma vida da ferramenta de 60 minutos
l_e	Comprimento de amostragem
l_m	Percurso de medição
l_n	Percurso final
l_t	Percurso de apalpamento
l_v	Percurso inicial
α_o	Ângulo de folga da ferramenta
β_o	Ângulo de cunha da ferramenta
γ_o	Ângulo de saída da ferramenta
ε_r	Ângulo de ponta da ferramenta
λ_s	Ângulo de inclinação da ferramenta
χ_r	Ângulo de posição da ferramenta
χ'_r	Ângulo de posição secundário da ferramenta

a	Avanço de rosca
a_p	Profundidade de corte
b	Largura de usinagem
d	Diâmetro exterior da porca
d'	Diâmetro exterior do parafuso
f	Avanço
f	Avanço
F	Força total de usinagem
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva ou de profundidade
F_a	Força ativa
h	Espessura de corte
h'	Espessura do cavaco
K_B	Largura de cratera
K_F	Distância da aresta à borda da cratera
K_T	Profundidade de cratera
N	Número de cut off
ϕ	Ângulo de cisalhamento
p	Passo de rosca
R_a	Rugosidade média
R_q	Desvio médio quadrático das rugosidades
R_z	Média das 10 maiores rugosidade
S	Aresta principal de corte
S'	Aresta secundária de corte
v_c	Velocidade de Corte
α	Ângulo da rosca
λ_c	Cut off

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVO GERAL	21
1.2.1 Objetivos específicos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 USINABILIDADE DOS MATERIAIS	22
2.1.1 Critérios empregados nos ensaios de usinabilidade	23
2.1.2 Ensaio de usinabilidade.....	24
2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	24
2.2.1 Processo de torneamento	26
2.2.2 Processo de rosqueamento.....	28
2.3 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE	29
2.3.1 Sistemas de planos de referência	31
2.3.2 Ângulos da ferramenta	32
2.4 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO	34
2.4.1 Tipos de cavaco	35
2.4.2 Formas de cavaco.....	37
2.5 AVARIAS, DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE.....	38
2.5.1 Avarias da ferramenta	38
2.5.2 Desgaste da ferramenta	40
2.5.3 Vida da ferramenta	41
2.6 FLUIDOS DE CORTE	44
2.6.1 Funções do fluido de corte	44
2.6.2 Classificação dos fluidos de corte	46
2.7 SISTEMAS DE LUBRIFICAÇÃO/REFRIGERAÇÃO	47
2.7.1 Jorro de fluido a baixa pressão	47
2.7.2 Introdução de novas tecnologias de lubrificação-refrigeração.....	48
2.7.3 Sistema de lubrificação com mínima quantidade de lubrificante	48
2.8 DESVIOS GEOMÉTRICOS.....	51
2.8.1 Diferença do círculo (Circularidade)	52
2.8.2 Diferença de posição paralela (Paralelismo)	53
2.9 ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	53

2.9.1 Parâmetros de avaliação da rugosidade	54
3 MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 PARÂMETROS DE CORTE	58
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	60
3.3 CORPO DE PROVA.....	61
3.4 EQUIPAMENTO DE USINAGEM.....	62
3.5 FERRAMENTA DE CORTE	63
3.6 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO/LUBRIFICAÇÃO COM JORRO ABUNDANTE	64
3.7 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO/LUBRIFICAÇÃO COM MQL.....	64
3.8 MEDIÇÃO DAS VAZÕES.....	66
3.9 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	67
3.10 MEDIÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA	68
3.11 MEDIÇÃO DOS DESVIOS DIMENSIONAL, DE FORMA E DE POSIÇÃO	70
3.12 MEDIÇÃO DE DUREZA (HRB)	71
3.13 MEDIÇÃO DAS ROSCAS	71
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4.1 ANÁLISE DO CAVACO.....	73
4.2 DESGASTE E AVARIAS DA FERRAMENTA DE CORTE	80
4.2.1 Desgaste de flanco e avarias da ferramenta de corte do torneamento	81
4.2.2 Desgaste de flanco e avarias da ferramenta de corte do rosqueamento	91
4.3 DESVIO DIMENSIONAL	95
4.3.1 Desvio dimensional no torneamento	95
4.3.2 Desvio dimensional no rosqueamento	100
4.4 DESVIO DE CIRCULARIDADE.....	102
4.5 DESVIO DE PARALELISMO.....	107
4.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	110
4.6.1 Rugosidade Ra.....	110
4.6.2 Rugosidade Rq.....	115
4.6.3 Rugosidade Rz.....	119
4.6.4 Acabamento da rosca.....	123
5 CONCLUSÕES	125
5.1 CONCLUSÃO DO OBJETIVO GERAL.....	126
REFERÊNCIAS.....	127
APÊNDICE A.....	134

APÊNDICE B	136
APÊNDICE C	137

1 INTRODUÇÃO

A usinagem, usada por milhares de anos, surgiu quando o homem pré-histórico percebeu que poderia utilizar recursos da natureza, como a pedra, e modificando-a inventaria objetos que lhe dava suporte nas caças, defesa e trabalho. Da necessidade de modelar estas pedras o homem aprendeu a desbastar, cortar, furar e fiar (INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE USINAGEM, 2014, p.1-6).

A usinagem esteve presente na evolução do homem, e evoluiu juntamente com ele. Uma prova dessa união é a divisão da Pré-História em Idade da Pedra Lascada, Idade da Pedra Polida e Idade dos Metais.

Grandes avanços ocorreram ao longo dos séculos: a descoberta dos metais por volta de 4000 A.C, a utilização do ferro a partir de 700 A.C, melhorias nos processos de fabricação do ferro e na siderurgia do aço no séc. XVII, e por fim no séc. XIX estudos sistemáticos da tecnologia da usinagem (SOUZA, 2011, p.4-7). A necessidade de novas descobertas e avanços tecnológicos nos processos de usinagem levam hoje a grandes buscas de melhorias para que os processos de usinagem satisfaçam as condições econômicas, ecológicas e legislativas.

Um fator para que haja grandes pesquisas em usinagem é o que se definiu como usinabilidade do material, dentre os fatores que podem influenciar na usinabilidade de um material, pode-se citar os parâmetros de corte como a velocidade de corte, avanço e meio de lubrificação/refrigeração (FERRARESI, 1970, p.569).

O fluido de corte é muito utilizado em fator das melhorias alcançadas com o seu uso. No entanto, nos últimos anos a utilização dele tornou-se criticada por causa dos prejuízos para a saúde dos operadores e para o meio ambiente quando mal descartado.

Diante dos inconvenientes apresentados pelo uso abundante de fluido e os gastos proporcionados por eles, surgiram diversos métodos de refrigeração que visam minimizar o consumo de fluido de corte ou eliminá-lo totalmente, esses sistemas de usinagem receberam o nome de usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL) e usinagem a seco (PROJETO PROGRAMA PILOTO PARA A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS POR RESÍDUOS PERIGOSOS, 2006, p.6).

1.1 JUSTIFICATIVA

Observa-se atualmente uma grande preocupação em nível nacional e internacional com questões relacionadas ao meio ambiente, isso levou países a formar conferências para discutir a emissão de poluentes no meio ambiente, e ditar leis que determinam a redução da emissão de poluentes prejudiciais ao meio ambiente. Dentre esses eventos pode-se citar a ECO-92, Kioto-1997 e Rio+10 (ZEILMANN et al., 2014, p.1).

Os fluidos de corte usados são considerados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR-10004 (2004, p.12) como resíduo perigoso por apresentar toxicidade, e seu descarte para o solo ou cursos de água gera graves danos ambientais. Essas considerações ajudaram o CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) a promulgar a Resolução n.º 362, de 23 de junho de 2005 que estabelece as diretrizes para o recolhimento e destinação de óleo lubrificante usado ou contaminado. O art. 1º desta resolução determina:

Art. 1º Todo óleo lubrificante usado ou contaminado deverá ser recolhido, coletado e ter destinação final, de modo que não afete negativamente o meio ambiente e propicie a máxima recuperação dos constituintes nele contidos, na forma prevista nesta Resolução (BRASIL, 2005, p.1).

A utilização de fluidos de corte tornou-se rigorosa, em razão da legislação vigente. Ligado a este motivo e preocupado com a saúde humana, pois o contato frequente do operador com o fluido de corte pode causar doenças pulmonares, dermatites e câncer, e preocupado com o meio ambiente, empresas e instituições de ensino tem procurado por meio de pesquisas, desenvolver métodos de usinagem que restrinjam a utilização de fluido de corte. A usinagem a seco e a mínima quantidade de lubrificante tem sido o foco destas pesquisas. Na usinagem a seco observa-se o desenvolvimento de ferramentas mais resistentes e alterações dos parâmetros como velocidade de corte e avanço, já na técnica MQL observa-se o desenvolvimento de dispositivos que melhor se adequam as máquinas operatrizes.

Motivos citados anteriormente torna o tema “tipo de lubrificação e refrigeração” um assunto de grande interesse, e a causa da realização deste trabalho.

1.2 OBJETIVO GERAL

Comparar o desempenho de diferentes sistemas de lubrificação/refrigeração (jorro abundante, MQL e usinagem a seco) na usinagem do aço SAE 1045 por meio da realização de ensaios de rosqueamento e torneamento em diferentes parâmetros de corte. E com isso verificar em qual meio de lubrificação/refrigeração o material apresentou melhor usinabilidade.

1.2.1 Objetivos específicos

- Obter qual sistema de lubrificação/refrigeração (jorro abundante, MQL ou usinagem a seco) resultou em um melhor valor das variáveis de saída estudadas (características dos cavacos, desgaste das ferramentas, desvios geométricos e acabamento superficial);
- Analisar a influência da velocidade de corte e do avanço nos valores das propriedades de usinagem;
- Comparar o desempenho dos meios de lubrificação/refrigeração nos processos de usinagem ensaiados (torneamento e rosqueamento) e verificar em qual deles a técnica MQL trouxe melhor resultado;
- Analisar se a combinação de alguns parâmetros de velocidade de corte, avanço e meio de lubrificação/refrigeração modifica a resposta da propriedade de usinagem estudada fora da tendência esperada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica descrita a seguir apresenta assuntos relacionados a usinagem e que eram necessários para compressão dos fenômenos envolvidos nesta pesquisa.

2.1 USINABILIDADE DOS MATERIAIS

Usinabilidade é definida por Diniz et al. (2008, p.149) como o “grau de dificuldade de se usinar um determinado material”.

Outra definição mais complexa para usinabilidade é dada por Ferraresi (1970, p.566):

A usinabilidade de um metal pode ser entendida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão.

As propriedades de usinagem do metal a que Ferraresi (1970, p.566) se refere são: vida da ferramenta de corte, força de usinagem, acabamento superficial da peça, temperatura de corte, característica do cavaco e produtividade.

De acordo com Dinis et al. (2008, p.149) um material pode ter uma boa usinabilidade quando se leva em consideração uma dessas propriedades, como a vida da ferramenta, e não ter boa usinabilidade quando é considerada outra propriedade, a rugosidade por exemplo.

O índice de usinabilidade segundo Ferraresi (1970, p.569) é função do material da peça, do processo mecânico, das condições de usinagem e do critério de avaliação empregado.

Com relação ao material da peça os fatores que mais influem são:

- Composição química;
- Micro estrutura;
- Dureza;
- Propriedades das tensões e deformações;
- Rigidez da peça;

Os processos mecânicos e as condições de usinagem que mais influem são:

- Material da ferramenta;
- Condições de usinagem (velocidade, avanço, profundidade e geometria da ferramenta);
- Fluidos de corte;
- Rigidez da máquina, ferramenta e do sistema de fixação da peça;
- Tipos de trabalhos executados pela ferramenta (operação empregada, corte contínuo ou intermitente, condição de entrada e saída da ferramenta).

O aço SAE 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com 0,45% de carbono em sua composição. Possui boas propriedades mecânicas, como boa usinabilidade quando laminado a quente ou normalizado. Muito aplicado na construção mecânica, em peças forjadas e usinadas para o setor de máquinas e automóveis, entre outros (BURGUER et al., 2009 apud SILVA; NETO 2012, p.7).

De acordo com Saltarriaga e Pablo (2008 apud SILVA; NETO 2012, p.8) os aços de médio teor de carbono possuem boa usinabilidade quando apresentam uma microestrutura Perlítica grosseira, com um mínimo de Ferrita obtida por recozimento.

2.1.1 Critérios empregados nos ensaios de usinabilidade

Segundo Ferraresi (1970, p.570) os ensaios mais comuns e de maior interesse de usinabilidade podem ser agrupados em dois grupos, critérios básicos e critérios específicos:

Os ensaios de Critérios básicos estão divididos em:

- a) Critérios baseados na vida da ferramenta.
- b) Critério baseado na força de usinagem.
- c) Critério baseado no acabamento superficial.
- d) Critério baseado na produtividade.

Os ensaios de critérios específicos são:

- a) Critério baseado na análise dimensional.
- b) Critério baseado na temperatura de corte.
- c) Critério baseado nas características do cavaco.

2.1.2 Ensaio de usinabilidade

De acordo com Diniz et al. (2008, p.150) o método mais aceito para medição do índice de usinabilidade é o ensaio de longa duração, onde o material ensaiado e o escolhido como padrão são usinados até o fim da vida da ferramenta, ou até um determinado valor de desgaste da ferramenta, de flanco (V_B) ou de cratera (K_T), em velocidades diferentes.

O índice de usinabilidade é dado pela seguinte relação mostrada na equação (1) (DINIZ et al., 2008, p.150):

$$I. U = \frac{V_{c20}(\text{material ensaiado})}{V_{c20}(\text{material padrão})} \quad (1)$$

Na equação acima V_{c20} é a velocidade de corte para uma vida da ferramenta de 20 minutos, pode ser utilizado também V_{c60} (60 minutos).

Além do ensaio de longa duração que se baseia na vida da ferramenta, existe o ensaio de curta duração, que além do critério da vida da ferramenta, é utilizado outros como a força de usinagem, acabamento superficial, etc. No ensaio de curta duração quando o critério é a força de usinagem ou a rugosidade da peça não há necessidade que o desgaste cresça até o fim da vida da ferramenta, pois com algumas passadas da ferramenta na peça obtém-se os valores desejados (DINIZ et al, 2008, p.150).

2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Existe uma série de processos de fabricação que pode ser utilizado para fabricação de uma peça. A escolha adequada do processo de fabricação a ser utilizado para confecção de uma peça dependerá do formato, das condições de

acabamento desejado e dos recursos disponíveis. A Figura 1 apresenta a classificação dos processos de fabricação:

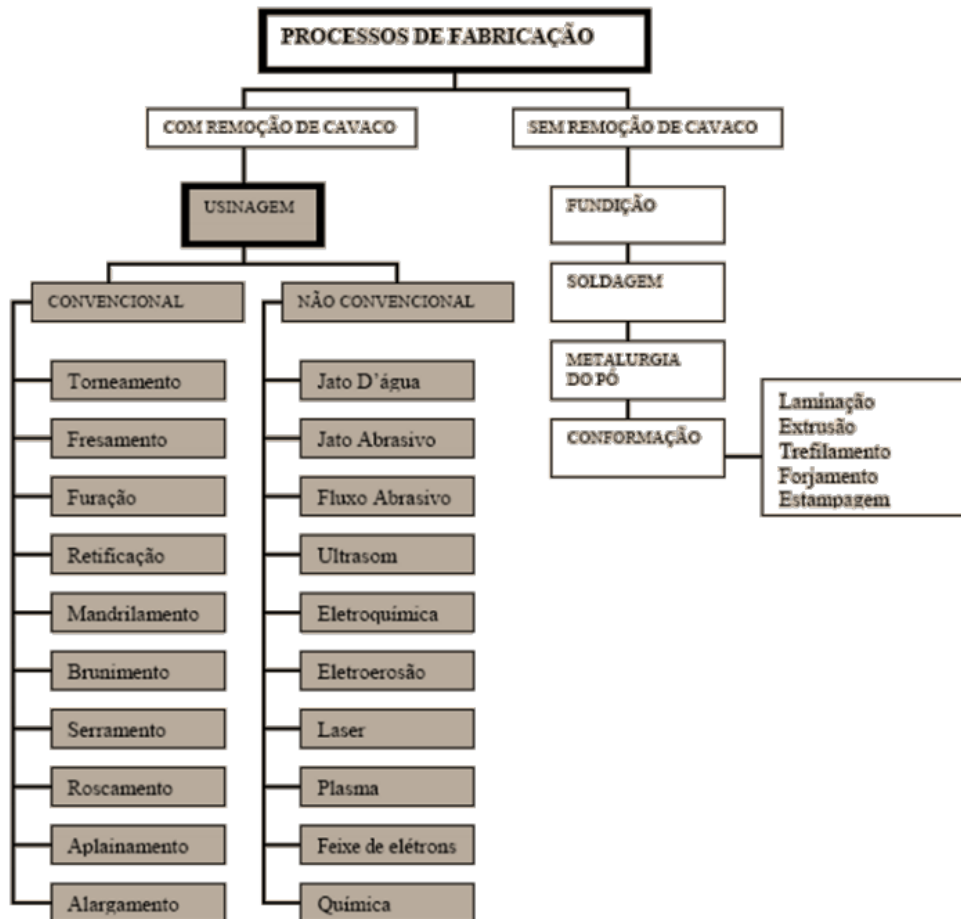


Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação
 Fonte: Souza (2011, p.6).

Segundo Souza (2011, p.8) os processos de usinagem convencionais ainda podem ser divididos em dois grupos:

- Operação de corte com ferramenta de geometria definida (aresta cortante com formato e tamanho definido): torneamento, fresamento, furação, rosqueamento, alargamento, serramento, limagem e aplainamento.
- Operações de corte com ferramenta de geometria não definida (partículas abrasivas com formatos aleatórios e composta por arestas minúsculas de corte): retificação, brunimento, lapidação, lixamento, polimento, jateamento.

Usinagem é a operação que confere a uma determinada peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens

por retirada de material na forma de cavaco (Konig & Klocle, 2002 apud Tedesco, 2007, p.10).

2.2.1 Processo de torneamento

O torneamento é um dos processos de usinagem mais utilizados, especialmente quando se deseja fabricar peças cilíndricas ou de revolução. As dimensões e formas das peças são obtidas por meio da retirada de material do corpo a ser usinado recorrendo a uma ferramenta monocortante de geometria definida (YAMAKAMI et al., [2006?], p.1).

O processo de torneamento é realizado em um torno e depende da combinação de dois movimentos: da rotação da peça que é presa na placa do torno e do avanço da ferramenta presa em um porta ferramenta. O movimento de avanço da ferramenta pode ser tanto ao longo do eixo da peça (comprimento) ou no sentido do centro da peça (diâmetro).

O torneamento pode ser classificado em torneamento de desbaste e de acabamento: O torneamento de desbaste retira grande quantidade de material da peça e por isso é realizado com valores altos de avanço e profundidade de corte, o torneamento de acabamento confere à peça precisão mais elevada e melhor acabamento superficial, por isso é realizado com baixos valores de avanço e profundidade de corte (AGOSTINHO; VILELLA; BUTTON, 2004, p.27).

A Figura 2 mostra os parâmetros de corte e as superfícies envolvidos no processo de torneamento:

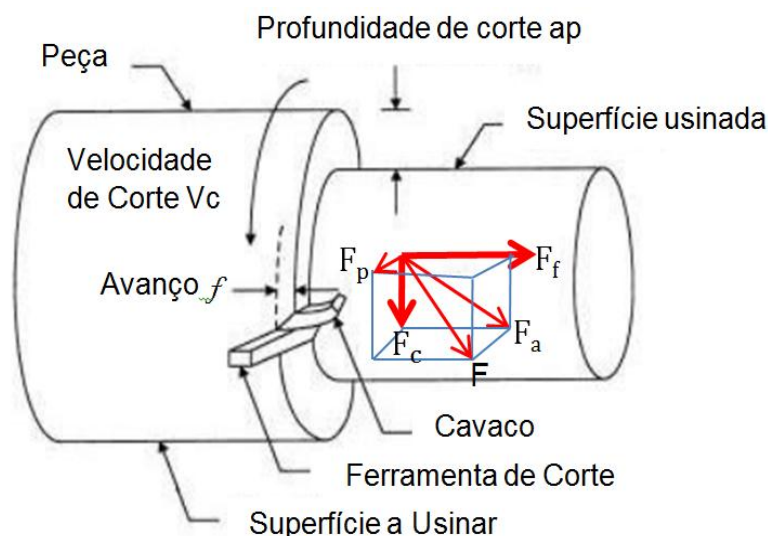


Figura 2 - Parâmetros de corte, superfícies em torneamento e forças de corte
 Fonte: Adaptado de Amorim (2002, p.6).

Estão representadas também na Figura 2 as forças de usinagem que atuam na ferramenta de corte durante o processo de corte do material.

Denomina-se força de usinagem a força total (F) que atua sobre a cunha cortante de uma ferramenta e é considerada agindo em direção e sentido sobre a ferramenta (ESPANHOL, 2008, p.23).

A força total (F) é decomposta em uma componente que está no plano de trabalho, chamada força ativa (F_a) e em uma componente perpendicular ao plano de trabalho, chamada força passiva ou de profundidade (F_p) (Diniz et al., 2008, p.58).

A força ativa (F_a) pode ainda ser decomposta na força de corte (F_c), que tendo a mesma direção da velocidade de corte determina a quase totalidade do trabalho de corte, e na força de avanço (F_f), que é a força projetada na direção do avanço, absorve pouco trabalho, mas contribui para a deflexão da ferramenta (STEMMER, 1995, p.123).

2.2.2 Processo de rosqueamento

Rosqueamento é o processo mecânico de usinagem ou conformação, destinado à obtenção de filetes com perfis roscados, tais filetes são obtidos por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução (CARVALHO, 2011, p.13).

“Rosca é um conjunto de filetes em torno de uma superfície cilíndrica. As roscas podem ser internas ou externas. As roscas internas encontram-se no interior das porcas e as roscas externas se localizam no corpo dos parafusos” (GORDO; FERREIRA, 1996, p.43).

De acordo com Hemus (2004, p.162) cada tipo de rosca tem forma distinta, porém há dimensões que são fundamentais em todas as roscas. Tais dimensões são apresentadas a seguir:

-Avanço (a): Distância que uma rosca percorre na direção de seu eixo ao dar uma volta completa;

-Passo (p): Distância entre o centro de dois filetes contíguo;

-Diâmetro exterior (d, d'): Diâmetro maior de uma rosca;

-Diâmetro interior (d_1 , d'_1): diâmetro menor da rosca;

-Diâmetro médio (d_2 , d'_2): também chamado de diâmetro dos flancos, é o diâmetro de uma superfície cilíndrica imaginária que passa pelos pontos médios dos flancos;

-Ângulo da rosca (α): ângulo que formam os dois flancos;

-Profundidade da rosca (h_1): chamada também altura do filete, é a distância que existe entre a crista e a base do filete.

As Figuras 3 e 4 mostram esquematicamente as dimensões definidas acima e os elementos de uma rosca (fundo, crista ou vértice, flanco, base e ponto médio do flanco):

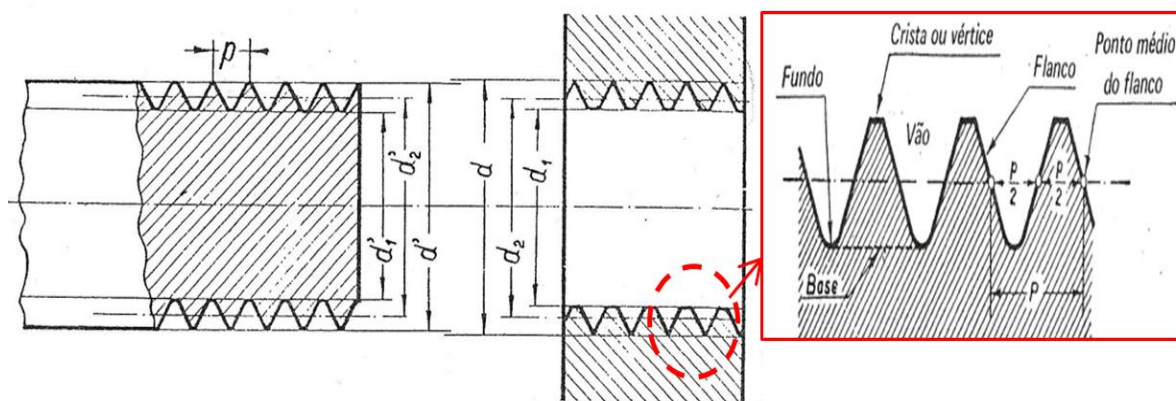


Figura 3 - Dimensões e elementos de uma rosca
 Fonte: adaptado de Hemus (2004, p.162).

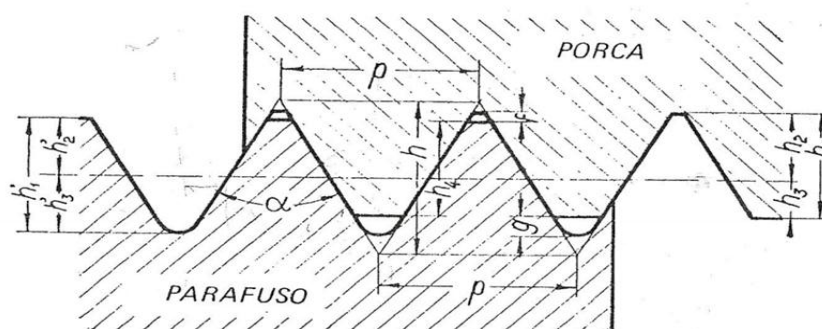


Figura 4 - Dimensões do filete
 Fonte: Hemus (2004, p.163).

2.3 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

A geometria da ferramenta de corte tem um papel muito importante nos processos de usinagem dos metais. Ela exerce uma influência marcante sobre algumas variáveis do processo de usinagem tais como: força, potência de corte, temperatura de corte, acabamento, desgaste da ferramenta e formação do cavaco (REIS, 2000, p.5).

Segundo Diniz et al. (2008, p.27) as partes construtivas de uma ferramenta de corte são:

- Parte de corte – parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte;

- Cunha de corte – é constituída pela intersecção das superfícies de saída e de folga, é a cunha da ferramenta (Figura 5);
- Superfície de saída (A_γ) – é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e se move (Figura 5);
- Superfície principal de folga (A_α) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a aresta principal de corte e determina uma folga da ferramenta com a superfície em usinagem principal (Figura 5);
- Superfície secundária de folga (A'_α) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a aresta secundária de corte e determina a folga da ferramenta com a superfície em usinagem secundária (Figura 5);
- Aresta principal de corte (S) – é formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal (Figura 5);
- Aresta secundária de corte (S') – é formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária (Figura 5);
- Ponta de corte – é o encontro das arestas principal e secundária de corte (Figura 5).

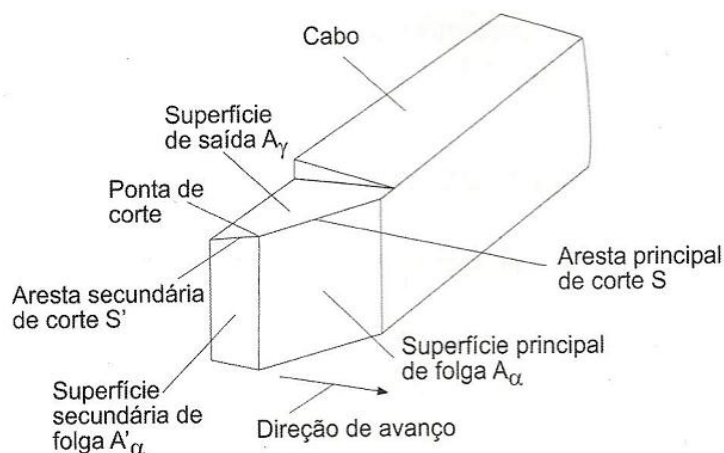


Figura 5 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento

Fonte: Diniz et al. (2008, p.26).

2.3.1 Sistemas de planos de referência

Para definir e especificar os ângulos de uma ferramenta de corte é necessário empregar sistemas de planos de referência. Existem dois sistemas de referência, o sistema de referência da ferramenta que é necessário para definir a geometria da ferramenta para a sua fabricação e medição, e o sistema de referência efetivo que é necessário para especificar a geometria da ferramenta, quando ela vai realizar uma operação de corte (STEMMER, 1995, p.13).

Para determinar os planos do sistema de referência da ferramenta é escolhido um ponto na aresta de corte principal no qual todos os planos passarão por ele. De acordo com Machado (2011, p.42-43) os planos localizados no sistema de referência da ferramenta essenciais para a determinação dos ângulos da cunha de corte são:

- Plano de referência da ferramenta (P_r): é o plano perpendicular à direção de corte. No torneamento o plano de referência é paralelo à superfície de apoio do cabo (Figura 6);
- Plano de Corte: existem dois planos de corte da ferramenta, o principal (P_s) e o secundário (P'_s). O plano principal é tangente à aresta principal de corte e perpendicular ao plano de referência. O secundário é tangente à aresta secundária de corte e perpendicular ao plano de referência, ambos passam pelo ponto de referência (Figura 6);
- Plano ortogonal (P_o): também chamado de plano de medida é perpendicular aos planos de referência e de corte da ferramenta (Figura 6);
- Plano admitido de trabalho (P_f): é paralelo à direção de avanço e perpendicular ao plano de referência (Figura 6).

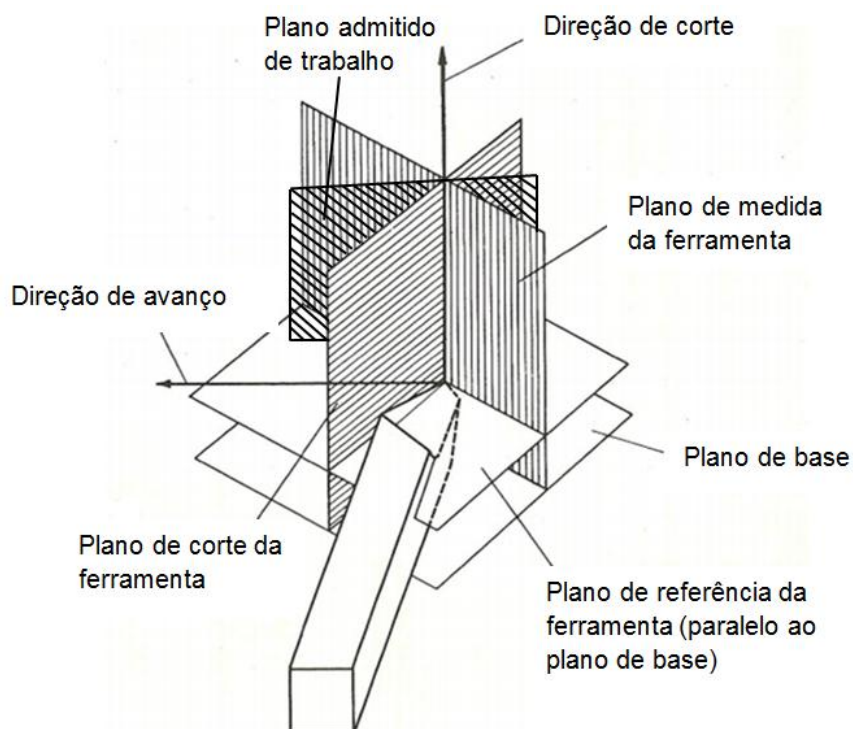


Figura 6 - Planos do sistema de referência de uma ferramenta de tornear
 Fonte: Ferraresi (1970, p.24).

2.3.2 Ângulos da ferramenta

Segundo Diniz et al. (2008, p.33-35) os principais ângulos da ferramenta definidos no sistema de referência da ferramenta são:

- Ângulo de posição da ferramenta (χ_r): é o ângulo formado entre o plano de corte e o plano admitido de trabalho, medido sobre o plano de referência (Figura 7);
- Ângulo de posição secundário da ferramenta (χ'_r): é o ângulo formado entre o plano de corte secundário da ferramenta e o plano admitido de trabalho, medido no plano de referência (Figura 7);
- Ângulo de ponta da ferramenta (ε_r): é o ângulo formado entre os planos principal e secundário de corte, medido sobre o plano de referência (Figura 7);
- Ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s): é o ângulo formado entre a aresta principal de corte e plano de referência, é o único ângulo medido sobre o plano de corte da ferramenta (Figura 7);

- Ângulo de saída da ferramenta (γ_o): é o ângulo formado entre a superfície de saída e o plano de referência, é medido sobre o plano ortogonal (Figura 7);
- Ângulo de cunha da ferramenta (β_o): é o ângulo formado entre as superfícies de saída e folga da ferramenta, é medido no plano ortogonal (Figura 7);
- Ângulo de folga da ferramenta (α_o): é o ângulo formado entre a superfície de folga e o plano de corte, é medido no plano ortogonal (Figura 7).

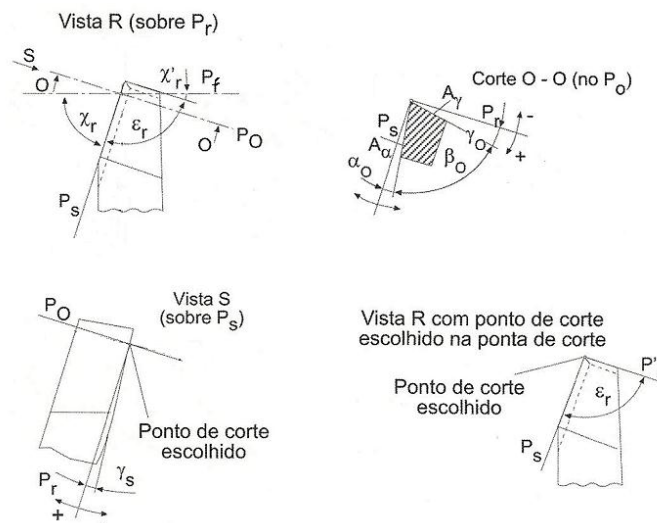


Figura 7 - Ângulos de uma ferramenta de tornear
Fonte: Adaptado de Diniz et al. (2008, p.35).

Os ângulos do sistema de referencia efetivo possuem definições análogas aos correspondentes encontrados no sistema de referência da ferramenta substituindo-se a designação “da ferramenta” por “efetivo” (STEMMER, 1995, p.35).

Segundo Machado (2011, p.53) algumas funções e influências dos ângulos da cunha cortante são:

- Ângulo de posição: distribui as tensões de corte favoravelmente e influencia na direção de saída do cavaco;
- Ângulo de ponta: possui como função principal assegurar a resistência da ponta da ferramenta e sua capacidade de dissipar calor;
- Ângulo de inclinação: possui três funções, controlar a saída do cavaco, proteger a aresta de corte da ferramenta contra impactos e, quando negativo atenuar vibrações;

- Ângulo de folga: se for muito baixo a cunha cortante não penetrará adequadamente na peça e se for muito elevado a cunha de corte perderá resistência;
- Ângulo de saída: influencia decisivamente na força e na potência necessária ao corte.

2.4 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO

“Cavaco é o material retirado da peça, pela ferramenta, durante o processo de usinagem” (ESPANHOL, 2008, p.21).

A formação do cavado divide-se basicamente em quatro eventos, descritos a seguir, e considera-se o corte ortogonal. No corte ortogonal pressupõe-se que a aresta de corte é reta e perpendicular às direções de corte e de avanço simultaneamente (KLAUBERG, 2009, p.22).

1º) Recalque inicial: a cunha cortante penetra no material da peça e faz com que uma porção deste material seja recalcada, ou seja, é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta sofrendo deformação elástica.

2º) Deformação plástica: o material recalcado passa a sofrer deformações plásticas até que as tensões não sejam mais suficientes para manter este regime, determinando assim a zona de cisalhamento primária (REIS, 2000, p.10). Na zona de cisalhamento é definido o plano de cisalhamento orientado pelo ângulo de cisalhamento (ϕ) (Figura 8).

3º) Ruptura: Ainda na zona de cisalhamento primário e com o material já no regime plástico, o avanço da ferramenta faz com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, iniciando a abertura de uma trinca no ponto “o” (Figura 8), que pode se estender por sobre o plano de cisalhamento primário até o ponto D, decretando a ruptura do material (PEREIRA et al., 2007, p.2). A extensão dessa trinca é um dos fatores determinantes do tipo de cavaco que será formado. Trincas longas tendem a formar cavacos descontínuos, enquanto trincas curtas tendem a gerar cavacos contínuos (AMORIM, 2002, p.9).

4º) Movimento sobre a superfície de saída da ferramenta: O movimento relativo entre ferramenta e peça faz com que o material deformado e rompido escorregue

sobre a superfície de saída da ferramenta, agora com espessura h' (Figura 8). Essa porção de material atravessa a superfície de saída da ferramenta ainda sofrendo altíssimas deformações plásticas cisalhantes definindo a zona de cisalhamento secundária (PEREIRA et al., 2007, p.3).

Ao mesmo tempo em que essas etapas acontecem uma nova porção de material é recalado e passará pelos mesmos processos repetindo o ciclo para formar novos cavacos.

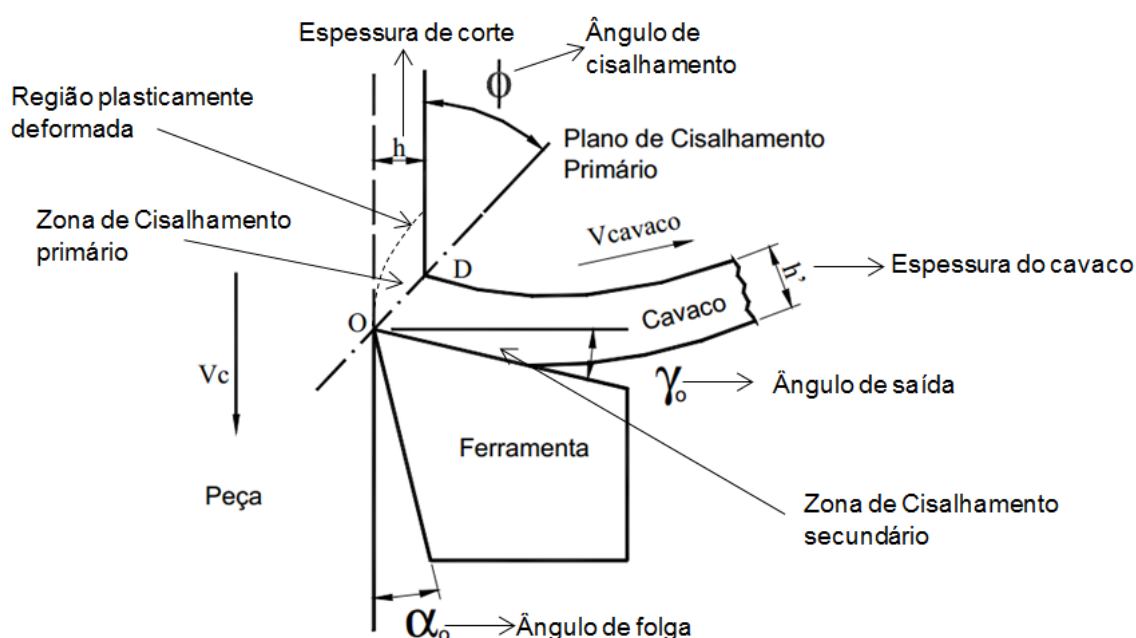


Figura 8 - Formação do cavaco no Corte Ortogonal
 Fonte: Adaptado de Reis (2000, p.10).

2.4.1 Tipos de cavaco

A composição das ligas que compõe o material da peça e os parâmetros de corte tais como o avanço, velocidade de corte e profundidade de corte são os fatores mais significativos na caracterização do tipo de cavaco a ser produzido (SILVA; SILVA, 2006, p.2).

- Cavacos contínuos (Figura 9): Os cavacos contínuos se caracterizam pelo grande comprimento, eles são formados quando o material é recalado na aresta de

corte e desliza sobre a superfície de saída da ferramenta sem que ocorra o seu rompimento. São comuns na usinagem de metais dúcteis, sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte e grande ângulo de saída da ferramenta (AMORIM, 2002, p.10).

- Cavacos de cisalhamento (Figura 9): O material ao escorregar ao longo do plano de cisalhamento, fissura no ponto mais solicitado, até a ruptura parcial ou total do cavaco e depois pelo efeito de pressão e temperatura esses fragmentos se soldam (STEMMER, 1995, P.114). O resultado é um cavaco em forma de fita contínua com serrilhado nas bordas.

- Cavacos de ruptura, cavacos descontínuo ou ainda cavacos arrancado (Figura 9): são produzidos na usinagem de materiais frágeis, como ferro fundido e latão. Esses cavacos tem a forma de pequenos fragmentos independentes e distintos, gerados essencialmente por ruptura, pela ação de tensões principais de tração-compressão (STEMMER, 1995, p.115).

- Cavacos segmentados, cavacos lamelares ou dente de serra (Figura 9): de acordo com Souza (2011, p.53) esse tipo de cavaco é constituído de diversas lamelas ou segmentos dispostos de forma contínua, são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre seguimentos com pouca ou nenhuma deformação em seus interiores e ocorre quando a estrutura do material é irregular ou quando vibrações (geradas por grandes avanços e/ou altas velocidades de corte) levam a variação na espessura do cavaco.

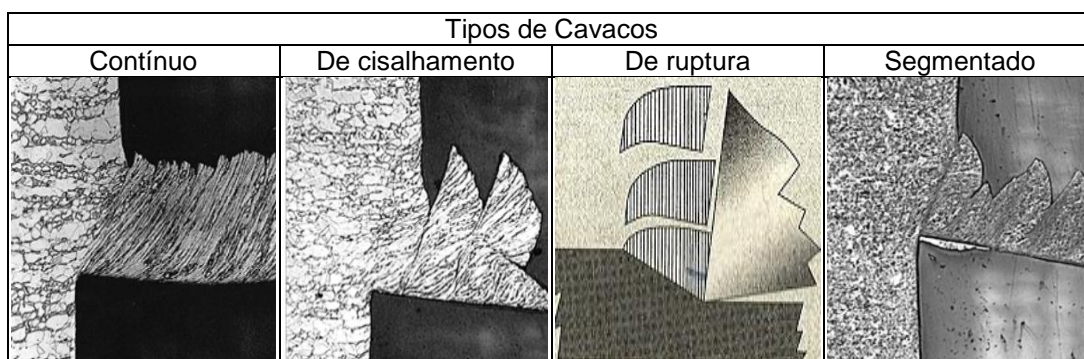


Figura 9 - Tipos de cavacos

Fonte: Adaptado de Souza (2011 p.54).

2.4.2 Formas de cavaco

Uma classificação detalhada das formas de cavaco é apresentada na Figura 10 :


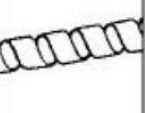


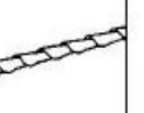

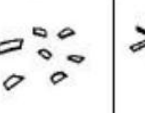
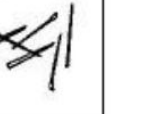





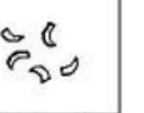



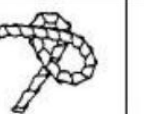

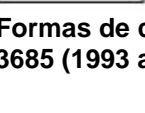

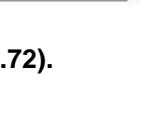
1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1 - 1 - Longo	2 - 1 - Longo	3 - 1 - Plano	4 - 1 - Longo	5 - 1 - Longo	6 - 1 - Conect.		
							
1 - 2 - Curto	2 - 2 - Curto	3 - 2 - Cônico	4 - 2 - Curto	5 - 2 - Curto	6 - 2 - Solto		
							
1 - 3 - Emaranhado	2 - 3 - Emaranhado		4 - 3 - Emaranhado	5 - 3 - Emaranhado			
							

Figura 10 - Formas de cavacos

Fonte: ISO 3685 (1993 apud MACHADO, 2011, p.72).

A forma e o tipo de cavaco formado depende primeiramente do tipo de material que esta usinando.

Para Ferraresi (1970, p.102) as maneiras de mudar as formas do cavaco são:

- Alterando-se as condições de usinagem;
- Dando-se uma forma especial à superfície de saída da ferramenta;
- Colocando-se elementos adicionais na superfície de saída.

Segundo Machado (2011, p.71) mudança dos parâmetros de corte como aumento da velocidade de corte, redução no avanço, ou aumento no ângulo de saída tendem mudar a forma do cavaco da direita para esquerda na Figura 10.

2.5 AVARIAS, DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE

As ferramentas de corte devem ser substituídas quando atingem seu limite máximo de desgaste ou quando acontece algum tipo de avaria (falha inesperada) de modo que estes fatores venham inutilizar a ferramenta ou prejudicar o bom desempenho do processo de usinagem.

2.5.1 Avarias da ferramenta

São consideradas avarias da ferramenta as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas, que ocorrem na aresta cortante durante a usinagem (FERRARESI, 1970, p.352).

As avarias ao contrário dos desgastes, que podem ser medidos ao longo de suas progressões, são difíceis de prever quando vão ocorrer.

A seguir são descritas as avarias que podem ocorrer nas ferramentas de usinagem:

- Trincas (Figura 11): As trincas podem ser causadas por variações térmicas ou variações de esforços mecânicos. Quando são de origem térmica, ocorrem perpendicularmente à aresta de corte e quando são de origem mecânica ocorrem paralelas à aresta de corte (ESPANHOL, 2008, p.11).
- Lascamento (Figura 11): tem como característica retirar partículas maiores de material do que observado nos desgastes. O lascamento é uma deterioração acidental e prematura que pode ocorrer quando a ferramenta é pouco resistente (ângulo de quina ϵ_r muito pequeno; pastilha muito dura e pouco tenaz) ou quando acontecem sobre solicitações mecânica (impactos ferramenta-peça, peças com inclusões duras e vibrações) ou térmica (mudança brusca de temperatura) (SOUZA, 2011, p.75).
- Sulcos distribuídos em forma de pente (Figura 11): “Os sulcos distribuídos em forma de pente aparecem no corte interrompido, na usinagem com

avanço variável e no acesso irregular do refrigerante de corte” (FERRARESI, 1970, p. 354).

- Deformação plástica (Figura 11): É a mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material, o que pode culminar na destruição total da aresta de corte. A deformação da aresta de corte pode ocorrer devido à pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada à alta temperatura. Provoca deficiência do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça (SEVERINO, 2011, p.23).
- Quebra (Figura 11): a quebra pode ser o resultado do aumento excessivo de desgaste ou principalmente de uma das outras avarias descritas anteriormente. Portanto também é comum que a quebra ocorra inesperadamente por causa de outros fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequeno, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte e entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos (DINIZ et al., 2008, p.108).

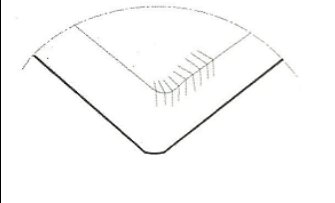
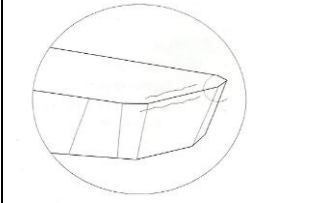
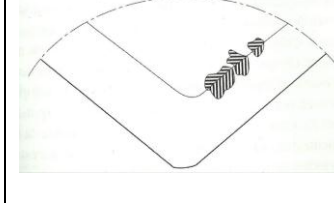
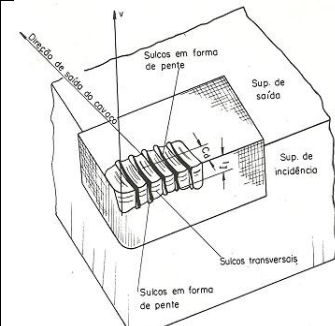
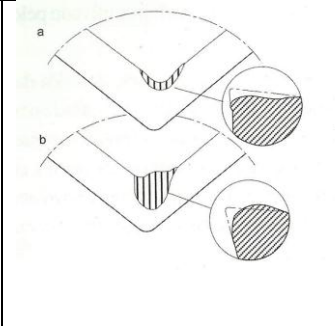
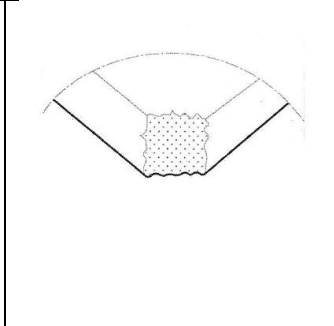
Avarias na ferramenta de corte		
Trinca de origem térmica	Trinca de origem mecânica	Lascamento
		
Sulcos em forma de pente	Deformação da aresta	Quebra da ferramenta
		

Figura 11 - Avarias da ferramenta de corte

Fonte: Adaptado de Diniz et al. (2008, p.106-108) e Ferraresi (1970, p.355).

- Aresta postiça de corte (Figura 12): Quando determinado material é usinado em condições tal que haja considerável força de atrito e adesão, pode resultar em um acúmulo de material aderido à superfície de saída da ferramenta, substituindo a zona de fluxo e a aresta de corte (REIS, 2000, p19). Este fenômeno é conhecido como aresta postiça de corte e exerce influência significativa sobre a vida da ferramenta e afeta o acabamento superficial e a tolerância dimensional da peça usinada.

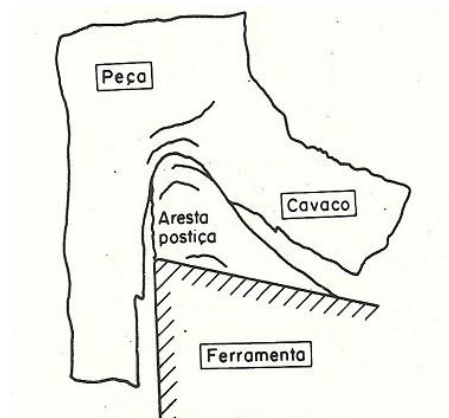


Figura 12 - Aresta postiça de corte
Fonte: Ferraresi (1970, p.368).

2.5.2 Desgaste da ferramenta

No decorrer do processo de usinagem dos metais, ocorre o contato físico da ferramenta com a peça e da ferramenta com o cavaco. Isto conseqüentemente acarretará mudanças na geometria e na forma original da aresta de corte da ferramenta, devido à ocorrência de desgaste progressivo (SÁ, 2010, p.28).

Existem três tipos de desgaste nas ferramentas de corte: desgaste frontal ou de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe.

Uma característica peculiar do desgaste em relação às avarias é que ele ocorre tanto no corte contínuo como no corte interrompido em qualquer parâmetro de usinagem utilizado.

- Desgaste frontal: também chamado de desgaste de flanco, este tipo de desgaste ocorre na superfície de folga da ferramenta (Figura 13) devido ao contato físico contínuo da peça com a ferramenta;
- Desgaste de cratera: ocorre na superfície de saída da ferramenta na zona de deslizamento (Figura 13) do cavaco devido ao contato físico contínuo entre a ferramenta e o cavaco;
- Desgaste de entalhe: ocorre na aresta de corte e superfície de folga da ferramenta. (Figura 13), pode ser ocasionado por oxidação devido a altas temperaturas e exposição ao ar ou ao fluido de corte (AMORIN, 2002, p.18).

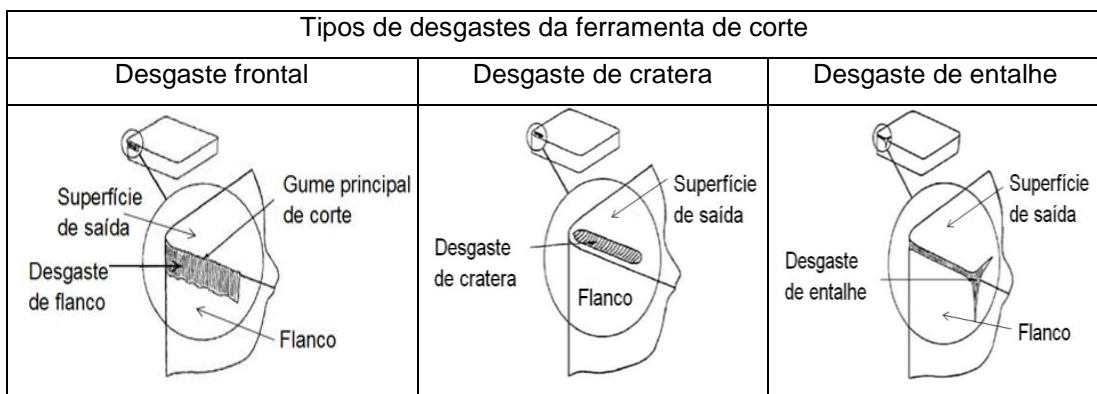


Figura 13 - Tipos de desgastes da ferramenta de corte
Fonte: Amorin (2002, p.17-18).

Segundo Casagrande (2004, p.13) o tipo de desgaste de ferramenta mais utilizado como critério de fim de vida de ferramenta é o desgaste de flanco. Este tipo de desgaste ocorre na superfície de folga da ferramenta, afetando sua afiação, e está presente em todas as operações de usinagem.

2.5.3 Vida da ferramenta

A vida de uma ferramenta de corte pode ser definida como o tempo que ela trabalha sem perder sua capacidade de corte. Quando a ferramenta perde sua capacidade de corte ou não atinge mais os parâmetros de tolerância exigida, ela deve ser trocada (ferramenta de metal duro) ou afiada (ferramenta de aço rápido).

Segundo Espanhol (2008, p.15) as características da peça, da ferramenta de corte, das condições de corte e do fluido de corte afetam a vida da ferramenta,

Ferraresi (1970, p.424) define os fatores para a fixação de um determinado desgaste que determina o fim de vida de uma ferramenta:

- 1°) O desgaste da superfície de saída da ferramenta atinge proporções tão elevadas, que se receia uma quebra do gume cortante;
- 2°) Os desgastes chegam a valores, cuja temperatura do gume cortante (proveniente em grande parte do atrito da ferramenta com o cavaco e com a peça) se aproxima da temperatura, na qual a ferramenta perde o fio de corte;
- 3°) Devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível manter as tolerâncias exigidas na peça;
- 4°) O acabamento superficial da peça usinada não é satisfatório;
- 5°) O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

Nos ensaios de usinabilidade o desgaste que determina o fim de vida da ferramenta é determinado baseado em normas. A norma ISO 3685 (1993 apud AMORIN, 2002, p.19) estabelece os seguintes critérios para determinar a vida útil de uma ferramenta (Figura 14):

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3$ mm;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmax} = 0,6$ mm,
- Profundidade de cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, (onde f representa o avanço);
- Distância frontal entre cratera e franco, $KF = 0,02$ mm;
- Falha catastrófica.

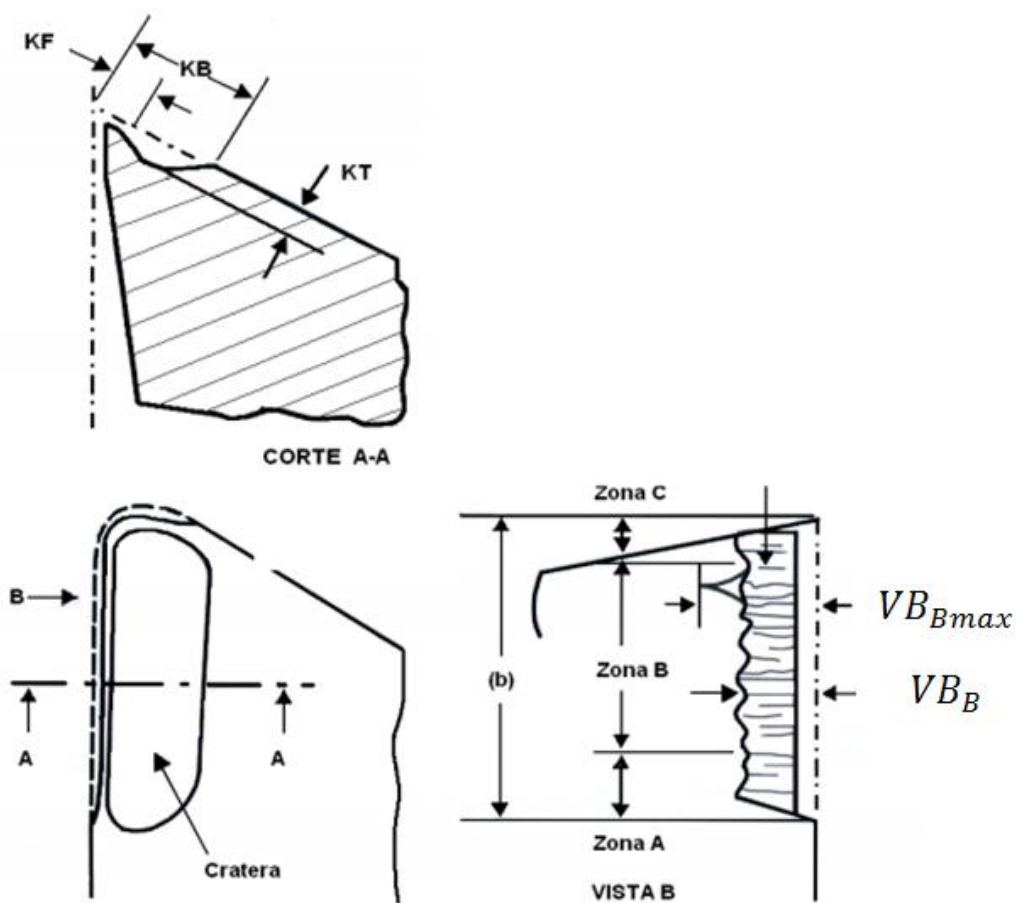


Figura 14 - Medição do desgaste em ferramentas de usinagem
 Fonte: Norma ISO 3585 (1993 apud SÁ, 2010, p.28).

Onde:

KB = largura de cratera [mm]

KT = profundidade da cratera [mm]

KF = distância da aresta à borda da cratera [mm]

VB_B = desgaste de flanco médio [mm]

VB_{Bmax} = desgaste de flanco máximo [mm]

b = largura de usinagem [mm]

2.6 FLUIDOS DE CORTE

Segundo Alves (2005 apud JULIO, 2009, p.27), foi Taylor quem em 1890 introduziu a utilização de fluido de corte na usinagem dos materiais. Inicialmente ele utilizou água para resfriar a região ferramenta-peça-cavaco, e conseguiu com isso aumentar a velocidade de corte em 33% sem prejuízo para ferramenta de corte. Depois começou a utilizar água e soda, ou água e sabão para evitar a oxidação da peça e/ou ferramenta.

Percebeu com a utilização da água que ela possuía o melhor calor específico de todos os fluidos disponíveis, tornando o melhor refrigerante possível, no entanto ela apresenta problemas de corrosão para os componentes da máquina. Para solucionar tal problema da corrosão causada sobre a peça, ferramenta e máquina foram misturados óleos à água para formar emulsões e melhorar a lubrificação do sistema peça/ferramenta/máquina (REIS, 2000, p.23).

2.6.1 Funções do fluido de corte

Durante o processo de usinagem de metais é gerado uma grande quantidade de calor, devido ao efeito produzido pela ferramenta de corte e a resistência do material. Para evitar o superaquecimento da ferramenta e peça são utilizados os fluidos de usinagem que devido às suas funções refrigerante e lubrificante evitam tal problema (PROJETO PROGRAMA PILOTO PARA A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS POR RESÍDUOS PERIGOSOS, 2006, p.11).

Segundo Machado (2011, p.176) as principais funções dos fluidos de corte são:

- Lubrificação a baixas velocidades de corte;
- Refrigeração a altas velocidades de corte;
- Remoção dos cavacos da zona de corte;
- Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação.

A função do fluido quando refrigerante é remover o calor da região de corte, a fim de diminuir a temperatura da ferramenta e da peça.

De acordo com Diniz et al. (2008, p.169) os requisitos que um fluido deve ter para retirar o calor da região do corte são:

- Baixa viscosidade;
- Capacidade de molhar o metal;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica.

Segundo Reis (2000, p.28) em altas velocidades de corte as condições não são favoráveis à penetração do fluido de corte na interface cavaco-ferramenta para que exerça a lubrificação, portanto a função do fluido nestas condições se restringe, basicamente, à refrigeração do sistema ferramenta/ peça / cavaco agindo diminuindo a temperatura média pelo aumento da dissipação de calor.

Ainda de acordo com Reis (2000, p.28) os fluidos de corte com a finalidade de lubrificar são aplicados em operações com baixas velocidades de corte, pois se acredita que nestas condições eles podem penetrar na interface cavaco-ferramenta. E também nestas condições de corte a temperatura não é um problema para uso de refrigerante.

Como lubrificante, o fluido de corte contribui para reduzir o atrito e a área de contato ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, sua eficiência vai depender da habilidade da penetração na interface peça-ferramenta-cavaco (MACHADO, 2011, p.176).

Na usinagem, o fluido de corte penetra entre as superfícies em contato pelo fenômeno da capilaridade, ajudado pela vibração entre ferramenta, peça e cavaco (JULIO 2009, p.32).

De acordo com o Projeto Programa Piloto Para a Minimização dos Impactos Gerados por Resíduos Perigosos (2006, p.13) os fluidos de corte devem possuir várias propriedades, a maioria proporcionadas pelos aditivos, tais como: anti-fricção; viscosidade adequada (baixa o suficiente para que o fluido chegue na zona a ser lubrificada e alta o bastante para permitir boa aderência); alto calor específico e condutividade térmica; anticorrosiva; antiespumante; antioxidante; alta capacidade de absorção de calor; alta capacidade de umectação; antidesgaste; compatibilidade com a maioria das pinturas e vedações; compatibilidade com metais ferrosos e não ferrosos; baixa tendência para originar precipitados sólidos; não causar

entupimentos dos tubos de filtrabilidade do fluido em uso; ter alta tratabilidade para descarte e ser de fácil eliminação, evitando danos ao meio ambiente.

Segundo Machado (2011, p.184) benefícios do uso dos fluidos de corte são:

- Aumento da vida da ferramenta;
- Redução das forças e potência de usinagem;
- Melhoria do acabamento da peça;
- Facilidade de remoção dos cavacos da região de corte;
- Redução do risco de distorção da peça.

2.6.2 Classificação dos fluidos de corte

De acordo com Diniz et al. (2008, p.176-179) os fluidos são classificados em:

- Emulsões: É constituída de pequena porcentagem de óleo emulsificável (vegetal ou mineral) e emulsificadores dispersos em pequenas gotas na água. A proporção de óleo-água varia de 1:10 à 1:100. Também são utilizados nesse tipo de fluido aditivos anticorrosivos e biocidas;
- Micro emulsões (fluidos semissintéticos): São emulsões que apresentam de 5 a 50% de óleo mineral e outros compostos químicos na água, formando partículas individuais;
- Soluções químicas (fluidos sintéticos): São compostos monofásicos de substâncias químicas dissolvidas completamente na água. Tais substâncias constituem-se de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão entre outros;
- Óleos: É comum o uso de óleos em operações de usinagem em que há calor gerado pelo atrito, estes óleos possuem grande poder lubrificante, o que resulta em menor quantidade de calor gerado. Os óleos integrais são constituídos de óleos minerais ou vegetais puros ou aditivados. Os óleos minerais são constituídos de hidrocarbonetos obtidos do refinamento do petróleo cru, suas propriedades dependem do comprimento da cadeia, estrutura e grau de refinamento.

2.7 SISTEMAS DE LUBRIFICAÇÃO/REFRIGERAÇÃO

Existem vários tipos de sistemas de lubrificação e refrigeração, a seleção adequada depende do tipo de serviço a ser executado e dos recursos disponíveis (SÁ, 2010, p.36).

2.7.1 Jorro de fluido a baixa pressão

Segundo Reis (2000, p.31) é o método mais tradicionalmente utilizado. É aplicado em baixa pressão sobre cabeça (posição A, Figura 15) contra a superfície do cavaco, ou ainda na superfície de saída da ferramenta (posição B, Figura 15). Um grande volume de fluido é utilizado para atuar em uma região pequena com efeito apenas refrigerante.

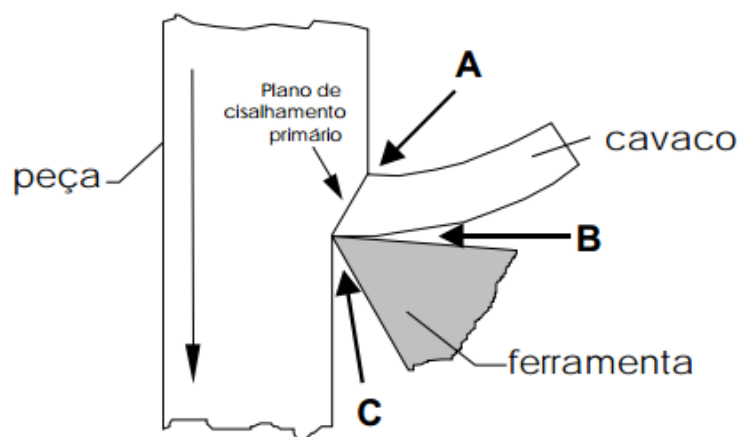


Figura 15 - Direções de aplicação do fluido de corte
Fonte: Machado (2011, p.186).

2.7.2 Introdução de novas tecnologias de lubrificação-refrigeração

A implantação de novas tecnologias em operações de usinagem de metais, em substituição às tecnologias clássicas, resulta em uma contribuição para a redução do impacto ambiental causado pelos fluidos descartados. Estas tecnologias estão sendo desenvolvidas para aprimorar os processos de usinagem, com o objetivo de atender os aspectos ambientais e econômicos. A usinagem com MQL e a usinagem a seco, são algumas alternativas que têm sido estudadas em substituição aos métodos tradicionais (PROJETO PROGRAMA PILOTO PARA A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS POR RESÍDUOS PERIGOSOS, 2006, p.31).

De acordo com Alves (2005 apud JULIO, 2009, p.34) os maiores fatores que contribuíram para justificar as pesquisas para minimizar ou restringir ao máximo o uso de fluidos de corte nos processos de usinagem foram os custos de operação do produto final, a preservação da saúde do operador, as exigências de conservação do meio ambiente e as áreas adjacentes afetadas.

A usinagem a seco é uma forma de reduzir os impactos ambientais e zelar pela saúde das pessoas. Algumas vantagens dessa técnica são: não poluir a atmosfera ou a água; não gerar resíduos de fluido nos cavacos e com isso diminuir o custo de descarte; não agredir a saúde humana. Um inconveniente na usinagem a seco, entretanto, é o maior atrito entre a ferramenta e a peça, uma vez que estarão submetidos a altas temperaturas, causando aumento no desgaste da ferramenta e redução de sua vida (OLIVEIRA, 2011, p.36).

2.7.3 Sistema de lubrificação com mínima quantidade de lubrificante

O método de mínima quantidade de lubrificação está entre a usinagem com refrigeração e a sem refrigeração. Apenas gotículas de óleo são lançada na área de corte ou dirigida por um jato de ar, isto é, atomizado, ao ponto onde está sendo executada a usinagem para produzir um filme de lubrificante protetivo. O volume de fluido pode variar em função do volume de cavacos e do processo de usinagem.

Essa mínima quantidade de fluido deve ser suficiente para reduzir o atrito da ferramenta e evitar a aderência dos materiais. (PROJETO PROGRAMA PILOTO PARA A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS POR RESÍDUOS PERIGOSOS, 2006, p.33).

Segundo Oliveira (2011, p.36) nos métodos convencionais de refrigeração, o fluido de corte não consegue entrar diretamente na região de corte sendo o MQL mais eficiente nesse aspecto e evita as inundações de óleo observadas na refrigeração convencional.

Segundo Spath et al. (1994, p.49) no sistema MQL a função lubrificante é garantida pelo óleo e a função refrigerante pelo ar comprimido e evaporação entálpica.

Na mínima quantidade de lubrificante é usado em média uma vazão de aproximadamente de 10 – 100 ml/h e pressão de 4 - 6,5 bar (ATTANASIO et al.2006 apud OLIVEIRA, 2011, p.37). Para intervalos curtos em algumas operações com ferramentas de diâmetro superior a 40 mm é aceito até 150 ml/h (KLAUBERG, 2009, p.52).

Os sistemas de MQL podem ser divididos em dois grupos principais: injeção do lubrificante externamente, por meio de jatos separados, e internamente através de orifícios na ferramenta. Os sistemas de aplicação interna recebem ainda distinção quanto ao número de canais. Nos sistemas de um único canal, a mistura aerossol é formada fora do fuso e o canal funciona como rota de alimentação da mistura. No caso dos sistemas de dois canais, ar e óleo são alimentados separadamente e a mistura é realizada no interior do fuso (WEINERT et al., 2004 apud ZEILMANN et al., [2009?], p.4).

Os sistemas externos apresentam como vantagem a possibilidade de utilização em máquinas convencionais, com baixo custo e esforço. Nesses sistemas, o número, a posição e a geometria dos bicos desempenham um papel importante na qualidade do resultado. Este tipo de MQL é geralmente aplicado em operações de retífica, serramento, fresamento e torneamento (ZEILMANN et al., [2009?], p.4).

De acordo com o Projeto Programa Piloto Para a Minimização dos Impactos Gerados por Resíduos Perigosos (2006, p.34) os métodos de aplicação de MQL externos podem ser:

- a) Gotejamento: pequenas gotas de emulsão são lançadas na zona de interface ferramenta - cavaco. Neste método, predomina a simplicidade do dispositivo, que pode ser o mesmo utilizado na aplicação por jorro.
- b) Spray: o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar criada por efeito Venturi e levado à superfície ativa como uma mistura. Nesse sistema, as vazões são consideráveis (da ordem de 0,5 a 10 L/h).
- c) Gotejamento com bombas dosadoras alternativas pneumáticas: feito com alimentação pulsatória de uma quantidade definida de lubrificante para a superfície ativa, sem ar. As taxas de fluxo são ajustáveis, segundo o tipo de bomba, da ordem de 0,1 a 1 ml por ciclo.
- d) Spray com tubulação de suprimento em separado: o lubrificante é misturado ao ar comprimido, fornecido separadamente, de forma que as quantidades de ar e lubrificantes possam ser ajustadas em separado, com consumo extremamente baixo, na faixa de 10 a 100 ml/h.

Segundo Weingaertner et al. (2002 apud KLAUBERG, 2009, p.53) no sistema por spray o fluido de corte é atomizado e acelerado pelo fluxo de ar contra a região de corte. Nessa concepção, é essencial que os bicos sejam posicionados próximos à região de corte e na direção adequada para assegurar que a maior parte das partículas do fluido chegue à região de interesse evitando assim desperdícios e tendo uma resposta rápida.

“Os fluidos lubrificantes utilizados devem ser ecologicamente corretos (isento de solventes e materiais fluorados) e com altíssima taxa de remoção de calor” (PROJETO PROGRAMA PILOTO PARA A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS POR RESÍDUOS PERIGOSOS, 2006, p.33).

Para Aoyama et al. (2008 apud JULIO, 2009, p.39) a técnica de MQL tem algumas desvantagens dentro do seu uso prático comparado com o método convencional de abastecimento com fluido , que são:

1. A pouca condição na remoção do cavaco da área de corte;
2. A pessoa do meio inala uma parte de névoa de óleo e esta inalação de lubrificante flutuante é prejudicial para a saúde humana;
3. Podem aparecer manchas em partes elétricas da máquina utilizada devido ao fato da névoa de óleo aderir dentro das partes elétricas ou componentes de máquina;
4. A névoa de óleo às vezes causa problemas de deslizamento ao lado da máquina, causando acidentes.

Outra desvantagem e desafio da técnica da mínima quantidade de lubrificação segundo Brinksmeier et al.(1999 apud OLIVEIRA, 2011, p.37) está na refrigeração, sendo problemática sua aplicação em situações em que se necessita alta refrigeração.

2.8 DESVIOS GEOMÉTRICOS

Nos processos de fabricação de peças por usinagem não se obtém as dimensões exatas determinadas no projeto. Por esse motivo é estabelecido uma faixa de dimensão que a peça pode variar sem que prejudique o seu funcionamento, montagem e resistência.

Oliveira et al. (2013, p.3) elaboraram um fluxograma (Figura 16) que mostra as variáveis de influência na tolerância do produto final das peças fabricadas por usinagem:

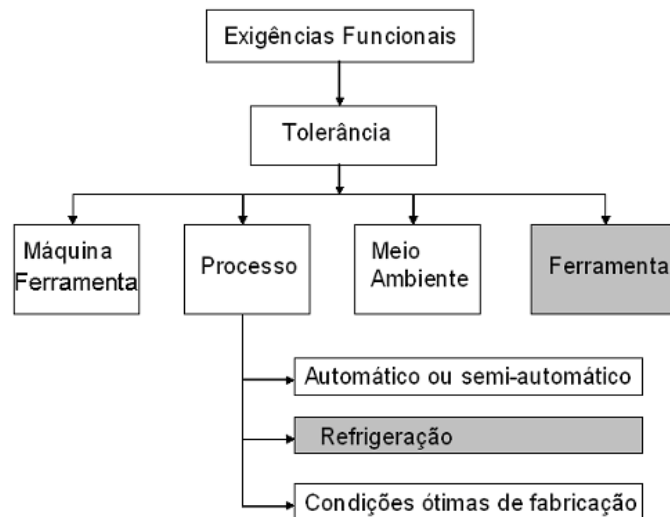


Figura 16 - Variáveis que exercem influência na tolerância de peças fabricadas por usinagem
 Fonte: Oliveira et al. (2013, p.3).

Dependendo da peça que será usinada somente as tolerâncias dimensionais não são suficientes para determinar como deve ficar a peça pronta, é necessário também determinar as tolerâncias geométricas, representadas pelos desvios de forma e posição (AGOSTINHO et al., 1977, p.113).

Segundo Agostinho et al. (1977, p.114) os desvios são classificados em:

- Desvio de forma: é o grau de variação das superfícies reais quando estas são comparadas aos sólidos geométricos teóricos que os definem. Podem ser Macros geométricos (ex. retilidade e circularidade) e micros geométricos (rugosidade superficial);
- Desvios de posição: é o grau de variação entre as diversas superfícies reais entre si, com relação ao seu posicionamento teórico. (ex. paralelismo e perpendicularismo).

2.8.1 Diferença do círculo (Circularidade)

O desvio de circularidade é a diferença de círculo (ovalização) observada em uma circunferência real quando comparada a dois círculos perfeitos concêntricos com diâmetros diferentes (Figura 17) (AGOSTINHO et al., 1977, p.122).

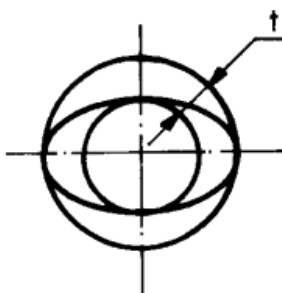


Figura 17 - Representação do desvio de circularidade
Fonte: NBR 6409 (1997, p.11).

2.8.2 Diferença de posição paralela (Paralelismo)

Tolerância de paralelismo entre duas retas em um mesmo plano é a diferença entre a máxima e a mínima distância entre estas duas retas que possuem um comprimento L (Figura 18) (AGOSTINHO et al., 1977, p.133).

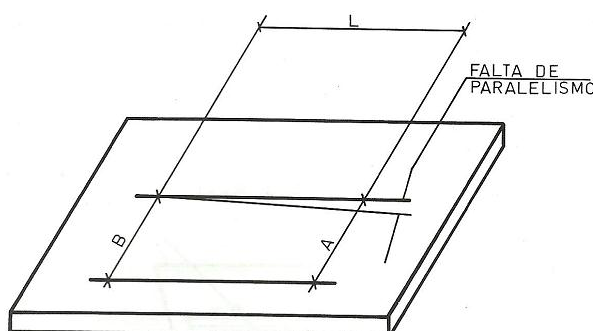


Figura 18 - Paralelismo entre duas retas
Fonte: Agostinho et al (1977, p.134).

2.9 ACABAMENTO SUPERFICIAL

O estudo do acabamento superficial tem grande importância em peças que exigem alta precisão, quando apenas as tolerâncias de dimensão, forma e posição não são suficientes. Segundo Agostinho et al. (1977, p.192) a rugosidade pode interferir nas seguintes características da peça: atrito, desgaste, corrosão, aparência, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluido (parede de dutos e tubos) e superfície de medição (blocos-padrões e micrômetros).

A rugosidade de uma peça pode ser definida como sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça e se encontra superposta ao perfil de ondulação (NOVASKI, 1994, p.55).

Nos rugosímetros, aparelho mais comumente utilizado para medir a rugosidade, existe um sistema de filtro destinado a separar as ondulações da rugosidade no perfil de medição. O comprimento de onda do filtro é chamado de

“cut-off” e varia de acordo com a operação ou parâmetros que a peça foi fabricada (NOVASKI, 1994, p.56).

De acordo com Novaski (1994, p.58-60) para medir a rugosidade de uma peça os seguintes parâmetros de medição (Figura 19) devem ser levados em consideração:

- Percurso inicial (l_v): tem a finalidade de amortecer as oscilações mecânicas e elétricas iniciais;
- Percurso de medição (l_m): extensão útil de avaliação;
- Comprimento de amostragem (l_e): são as divisões do percurso de medição de modo que permita separar as ondulações da rugosidade, é também chamado de cut-off;
- Percurso final (l_n): tem a função de amortecer as oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição;
- Percurso de apalpamento (l_t): é a soma dos percursos de medição, inicial e final.

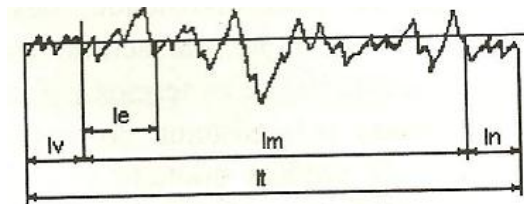


Figura 19 - Percurso de apalpamento, medição, amostragem, inicial e final
Fonte: Novaski (1994, p.58).

2.9.1 Parâmetros de avaliação da rugosidade

Os parâmetros de avaliação de rugosidade mais utilizados e que serão estudados neste trabalho estão descritos a seguir e são baseados na profundidade da rugosidade.

- Rugosidade média (R_a): é a média aritmética (Equação 2) dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média num percurso de medição l_m (Figura 20) (NOVASKI, 1994, p.60).

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

Onde

n = número de ordenadas consideradas

y = valor da ordenada

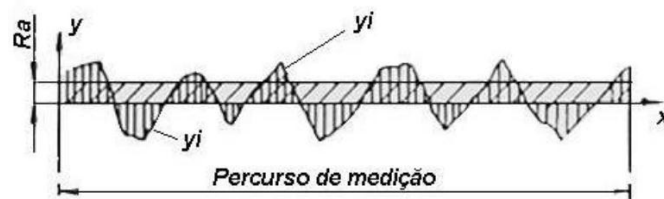


Figura 20 - Rugosidade média
 Fonte: Mitutoyo (apud AMORIN, 2002, p.24).

- Desvio médio quadrático (R_q): é a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação á linha média em um comprimento de amostragem. (AGOSTINHO et. al, 1977 , p.204).

$$Rq = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)} \quad (3)$$

- Altura das irregularidades dos 10 pontos (R_z): é a média aritmética de 5 valores de rugosidade, sendo cada valor a maior rugosidade, de cada comprimento de amostra (Figura 21). (NOVASKI, 1994 , p.61).

$$Rz = \frac{Z_1+Z_2+Z_3+Z_4+Z_5}{5} \quad (4)$$

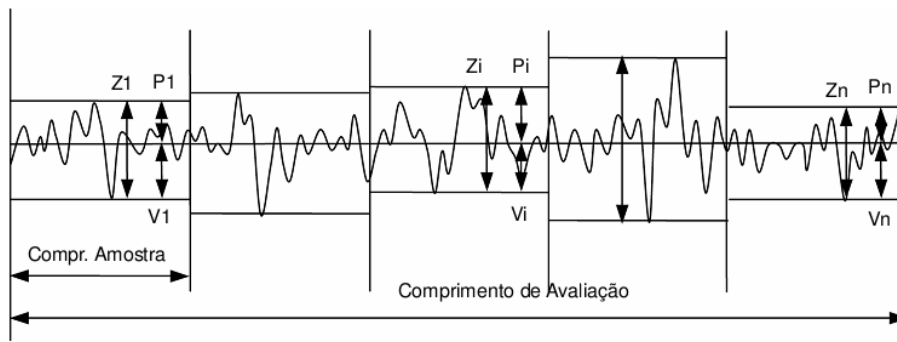


Figura 21 - Altura máxima Rz
Fonte: Mitutoyo (2009, p. 18-20).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentado o desenvolvimento experimental deste trabalho. São descritos os equipamentos, materiais, ferramentas, parâmetros de entrada, as formas de medição das variáveis de saída e o planejamento experimental utilizado.

A preparação dos corpos de prova e todos os experimentos analisados neste trabalho foram realizados na oficina mecânica do departamento acadêmico da mecânica (DAMEC) da UTFPR campus Cornélio Procópio. A medição da rugosidade, desvios de circularidade, desvios de paralelismo e diâmetros dos corpos de prova foram medidos também na oficina mecânica. As Fotografias dos desgastes dos insertos de metal duro, as Fotografias dos cavacos e a medida da dureza dos corpos de prova foram obtidas no laboratório de estudos de materiais e ensaios.

O fluxograma da Figura 22 apresenta a sequência das etapas para realização deste trabalho:

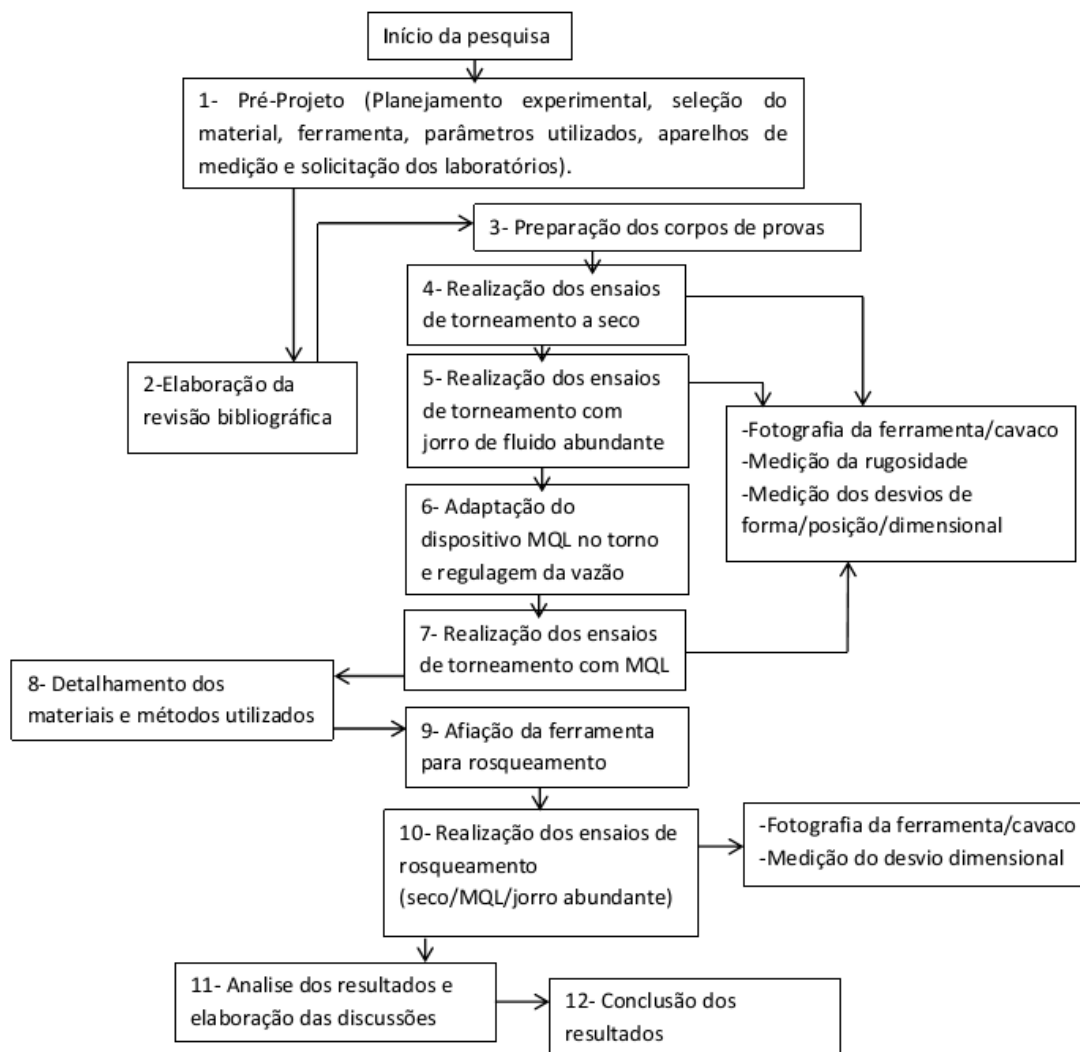


Figura 22 - Sequência das etapas deste trabalho

Fonte: Autoria própria.

3.1 PARÂMETROS DE CORTE

Neste estudo avaliou-se a influência dos parâmetros de corte em algumas variáveis respostas obtidas na usinagem do aço SAE 1045, os parâmetros variados foram a velocidade de corte, avanço, meio de lubrificação e processo de usinagem. Entre os processos de usinagem foram utilizados o torneamento e rosqueamento.

Os parâmetros de usinagem variados no torneamento foram os seguintes: velocidades de corte de 125 m/min (800 rpm), 157 m/min (1000 rpm) e 196 m/min (1250 rpm), entre os avanços foram utilizados 0,05 mm/rev e 0,1 mm/rev já os meios

de lubrificação/refrigeração utilizados foram o jorro de fluido abundante, a MQL (mínima quantidade de lubrificante) e usinagem a seco (sem uso de fluido).

A profundidade de usinagem manteve-se constante no valor de 1mm em todos os ensaios. A quantidade de passes para cada ensaio foi de 6 passes, depois foi feita a medição de todas as variáveis respostas.

As respostas avaliadas foram a rugosidade da peça, desvio de paralelismo, desvio de circularidade, desvio dimensional, desgaste da ferramenta de corte e formação do cavaco.

No rosqueamento variou-se apenas o meio de lubri-refrigeração, os mesmos utilizados no experimento de torneamento.

A velocidade de corte utilizada no rosqueamento foi de 37m/min (400 rpm), fez-se uma rosca métrica M 30 com as seguintes características (Figura 23): diâmetro externo de 30 mm, diâmetro interno de 25,53 mm, passe de rosca de 3,5 mm, altura do filete de 2,15 e ângulo do perfil da rosca de 60°.

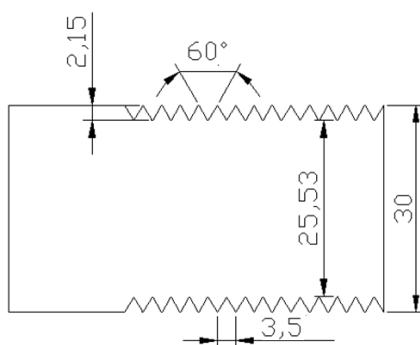


Figura 23 - Representação das dimensões da rosca em milímetros

Fonte: Autoria própria.

As variáveis dependentes avaliadas no rosqueamento foram o desvio dimensional, qualidade superficial da rosca, desgaste da ferramenta e formação do cavaco.

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento proposto neste estudo consiste em vários parâmetros de usinagem que são variados. Segundo Montgomery e Runger (1999, p.297) quando vários fatores são de interesse em um experimento, um planejamento fatorial de experimentos deve ser usado.

Ainda segundo Montgomery e Runger (1999, p.297) em um planejamento fatorial todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas.

As combinações e quantidade de ensaios a serem realizados no torneamento foram então definidas com base no planejamento de experimentos fatoriais gerais.

O planejamento fatorial resultante foi 2x3x3 referente a dois níveis de avanços, três níveis de velocidades de corte e três níveis de meios de lubri-refrigeração. Dessa forma a quantidade total de ensaios diferentes do torneamento foi de 18 combinações, e como para todas as condições foram realizados três réplicas, a quantidade total de ensaios no torneamento foi de 54 ensaios.

O Quadro 1 mostra como ficou a combinação dos ensaios:

Combinação dos ensaios do torneamento				
Avanço	Velocidade de corte	Meio de lubri-refrigeração		
		Seco	Jorro	MQL
0,05 mm/rev	125 m/min	1° ensaio	7° ensaio	13° ensaio
	157 m/min	2° ensaio	8° ensaio	14° ensaio
	196 m/min	3° ensaio	9° ensaio	15° ensaio
0,1 mm/rev	125 m/min	4° ensaio	10° ensaio	16° ensaio
	157 m/min	5° ensaio	11° ensaio	17° ensaio
	196 m/min	6° ensaio	12° ensaio	18° ensaio

Quadro 1 - Combinação dos ensaios do torneamento

Fonte: Autoria própria.

No rosqueamento como dito, variou-se apenas o meio lubri-refrigerante, sendo três níveis, resultando em três condições diferentes de ensaio (Quadro 2) e totalizando nove ensaios com as três réplicas para cada parâmetro.

Combinação dos ensaios do rosqueamento	
Meio de lubri-refrigeração	N° ensaio
Seco	1° ensaio
Jorro	2° ensaio
MQL	3° ensaio

Quadro 2 - Combinação dos ensaios do rosqueamento
Fonte: Autoria própria.

3.3 CORPO DE PROVA

Os corpos de prova para a realização dos experimentos foram confeccionados com aço SAE 1045, cuja composição química está no Quadro 3. As dimensões dos corpos de prova foram de 50 mm de diâmetro inicial e 100 mm de comprimento útil para usinagem. Foram feitos 18 corpos de prova de acordo com a necessidade do estudo.

Composição química do aço SAE 1045	
Elemento	Porcentagem
Carbono(c)	0,42 - 0,50
Ferro (Fe)	98,51 - 98,98
Manganês (Mn)	0,60 - 0,90
Enxofre (S)	Até 0,050
Fosforo(P)	Até 0,040
Total	100

Quadro 3 - Composição química do aço SAE 1045
Fonte: Matweb (2014).

A Figura 24 apresenta os desenhos com as dimensões teóricas em milímetros dos corpos de prova no início e no final dos ensaios.

Dimensões dos corpos de prova em milímetros antes e após a realização dos ensaios	
Corpo de prova no início do ensaio	Corpo de prova após a primeira réplica
Corpo de prova após a segunda réplica	Corpo de prova após a terceira réplica (término do ensaio)

Figura 24 - Desenhos com as dimensões teóricas dos corpos de prova antes e depois da realização dos ensaios
Fonte: Autoria própria.

3.4 EQUIPAMENTO DE USINAGEM

Os experimentos foram realizados em um torno convencional (Fotografia 1) marca Romi, modelo MS 205. Este torno tem como principais características potência instalada de 7,1 KW, rotações mínima de 31,5 rpm e máxima de 2500 rpm, e comprimento máximo entre pontas de 1000 mm.



Fotografia 1 - Torno mecânico convencional da oficina mecânica da UTFPR
Fonte: Autoria própria.

3.5 FERRAMENTA DE CORTE

Um dos objetivos desta pesquisa foi analisar o desgaste da ferramenta durante as operações de usinagem, para isso no torneamento foi utilizado como ferramenta de corte um inserto de metal duro da marca Ceratizit identificado como CNMG 120408EN-TM / CTC1125 (Figura 25). Esta ferramenta apresenta 8 arestas de corte e suas dimensões são: comprimento(l) 12.90mm, largura(d) 12.70mm, raio de ponta(r) 0,8mm, altura(s) 4,76mm e furo de centro (d_1) 5,16 mm de diâmetro.

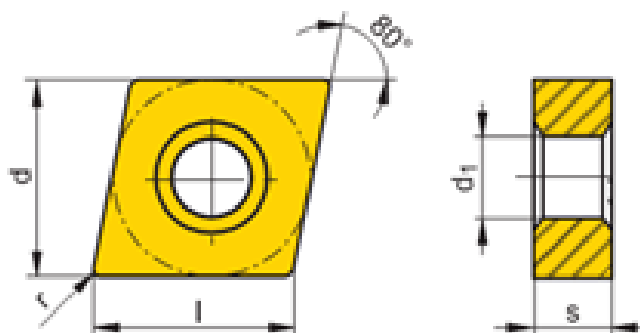
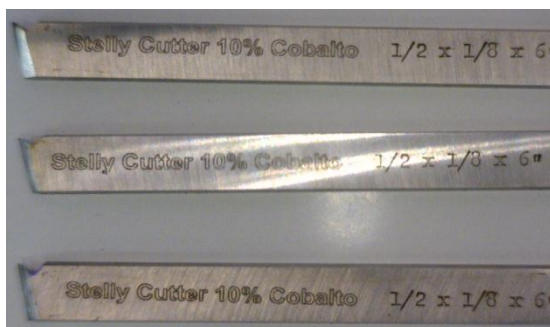


Figura 25 - Ferramenta de corte utilizada com a indicação das dimensões
Fonte: Cerratizit (p.A73).

As ferramentas de corte utilizadas no rosqueamento foram bedames de aço rápido com 10 % de cobalto com as dimensões de 1/2" x 1/8"x 6" (Fotografia 2), fornecedor desconhecido. Para cada meio lubri-refrigerante foi afiada uma ferramenta.



Fotografia 2 - Ferramentas de corte utilizadas no rosqueamento
Fonte: Aatoria própria.

3.6 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO/LUBRIFICAÇÃO COM JORRO ABUNDANTE

Na usinagem com fluido abundante foi utilizado o sistema de refrigeração do torno, que possui uma bomba de potência de 90 W, um reservatório, mangueiras e um bico ajustador. A vazão utilizada neste sistema de refrigeração/lubrificação foi de 54,5 litros/hora e o fluido utilizado foi uma emulsão de 1/20 (1 parte de óleo e 20 de água) da marca UNIX, constituído dos seguintes compostos: óleo básico naftênicos, aditivos anticorrosão, antioxidação, antidesgaste, antiespuma, emulgador e bactericida.

3.7 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO/LUBRIFICAÇÃO COM MQL

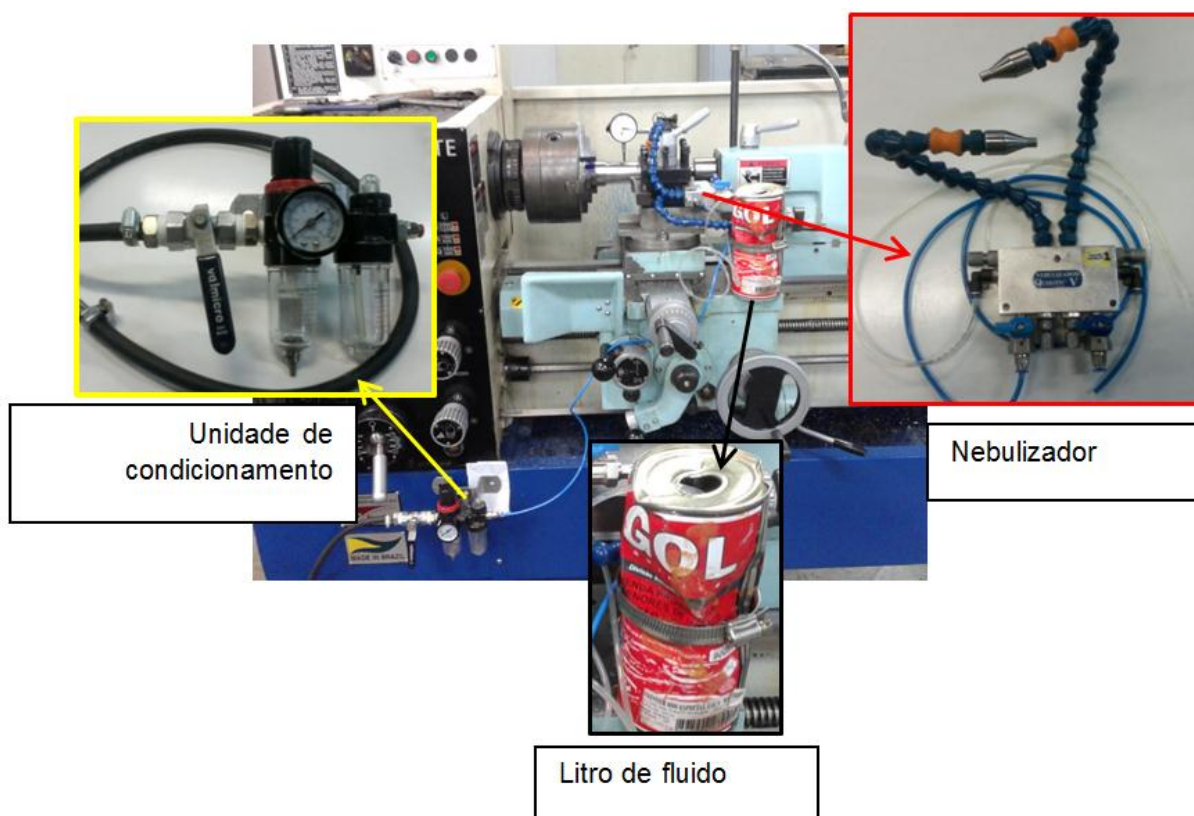
A pulverização do fluido na usinagem com MQL fez-se com a utilização do nebulizador V Tapmatic (Fotografia 3). Este dispositivo pulveriza o óleo pelo método spray. Ele possui duas entradas de ar comprimido, duas entradas de fluido e dois

tubos Fixoflex com bicos pulverizadores na extremidade. Uma característica peculiar deste aparelho é a regulagem independente de cada entrada de ar e de fluido.

Para maior controle da vazão e objetivo desta pesquisa utilizou-se apenas uma entrada de pulverização, controlando a vazão do fluido na faixa de 90 ml/h.

A pressão do ar comprimido utilizado na entrada do aparelho foi regulada com uma unidade de condicionamento (Fotografia 3) fixado no torno, o ar pode então ser filtrado e regulado na pressão de 3,2 Bar.

A adaptação do sistema MQL (Fotografia 3) no torno foi realizada de maneira simples e fácil. O aparelho de MQL foi preso no suporte do porta ferramenta, ao lado oposto da ferramenta, o litro de fluido ficou em cima do carro transversal e a unidade de condicionamento foi parafusado em frente a caixa de engrenagens.



Fotografia 3 - Adaptação do sistema MQL e os componentes utilizados
Fonte: Autoria própria.

Neste sistema de refrigeração/lubrificação foi utilizado o fluido da marca Quimatic, indicado para usinagem de metais ferrosos, aço inox e pastilha de metal duro, este fluido é composto de anticorrosivos, aditivos de lubricidade e água.

3.8 MEDIÇÃO DAS VAZÕES

Para a estimativa da vazão de fluido no método de jorro abundante foi utilizado um Becker graduado, colocado em baixo do bocal de saída de fluido onde foram coletadas três amostras de fluido com 900 ml e cronometrados os diferentes tempos de cada amostra, depois foi calculado a vazão para cada amostra e a média aritmética das referidas vazões (cálculos no apêndice A) obtendo um valor de 54,5 litros/hora.

Para a regulagem da vazão no sistema de lubrificação com MQL foi necessário um procedimento criterioso. A regulagem das válvulas de fluido e de ar comprimido foram feitas a partir de uma folha de papel colocada em frente ao bico pulverizador (Fotografia 4) e observou-se a velocidade com que a folha era molhada, e assim regulado a vazão de acordo com os objetivos do estudo.



Fotografia 4 - Ajustagem da vazão do MQL observando as borrifadas na folha
Fonte: Autoria própria.

O segundo passo foi montar um conjunto composto por Becker e estopa, conforme Fotografia 5 para estimar a vazão do sistema. A utilização da estopa foi devido ao fato de quando as mínimas quantidades de fluido fossem injetadas em direção ao Becker as estopas as absorveriam. Para este procedimento o Becker foi pesado vazio e depois o Becker com 300 ml de fluido para calcular a densidade do fluido, estimado em 0,983g/ml (cálculos no apêndice A). Em seguida foi pesado o Becker com as estopas.

O próximo passo foi introduzir o bico do aparelho MQL no interior do conjunto Becker-estopa, de modo a garantir que o óleo ficasse retido na estopa e deixar por 5 minutos o aparelho em funcionamento. Depois foi pesado o conjunto com as estopas molhadas pelo fluido. O último procedimento descrito foi repedido por três vezes e por fim foi calculada a vazão de cada amostra e calculada a média aritmética da vazão, os cálculos estão no apêndice A, obtendo um valor de 90 ml/hora.



Fotografia 5 - Estimativa da vazão pelo peso do fluido
Fonte: Autoria própria.

3.9 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

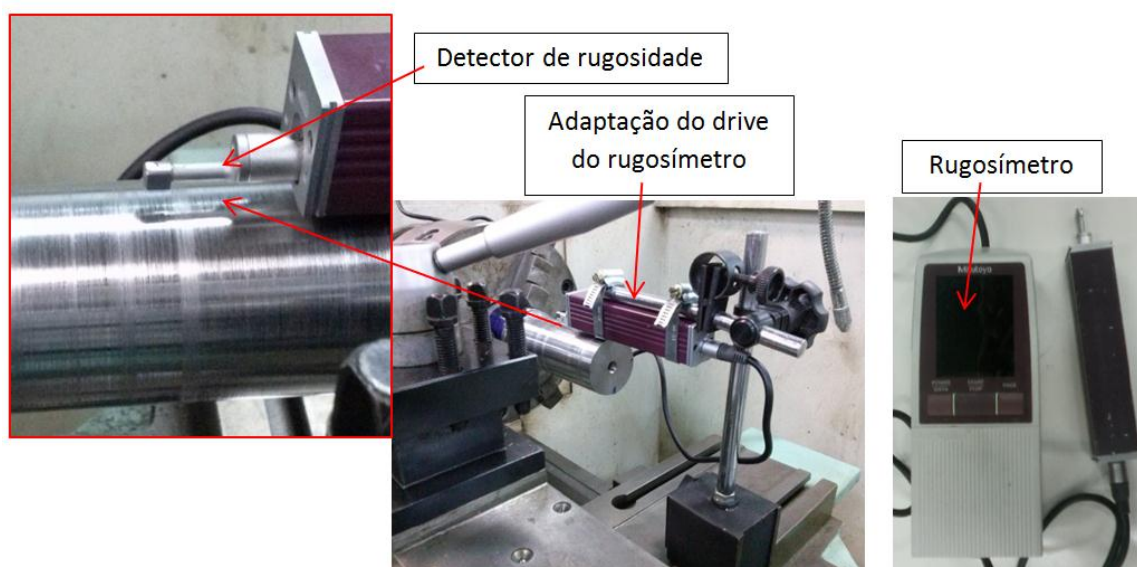
O acabamento superficial do corpo de prova usinado foi avaliado com a utilização de um rugosímetro (Fotografia 6), marca Mitutoyo, modelo SJ-210. Para

realizar a medida da rugosidade o drive do rugosímetro foi adaptado no suporte do relógio comparador e a peça permaneceu presa no torno.

Os parâmetros de medição utilizados no rugosímetro foram: cut off(λ_c) 0.8mm, norma ISSO 1997, velocidade de medição 0,5mm/s, faixa de medição alta, Filtro Gauss, perfil R, faixa de medição auto, e número de cut off (N) igual a 5.

Os Parâmetros de avaliação da rugosidade medidos foram a Rugosidade média (R_a), desvio médio quadrático (R_q) e altura média das irregularidades dos 10 pontos (R_z).

Para cada réplica do estudo foram realizadas cinco medidas em pontos diferentes do corpo de prova, escolhidos de forma aleatória, as medidas constam no apêndice C.



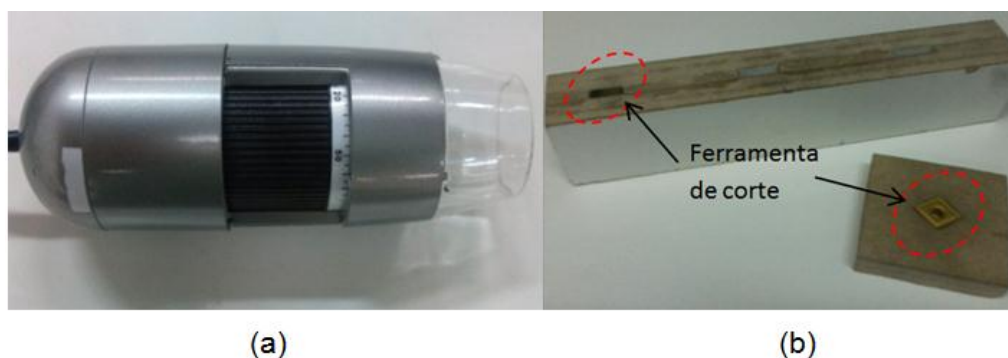
Fotografia 6 - (a) Adaptação do drive no suporte do relógio comparador, (b) Rugosímetro Mitutoyo SJ-210
Fonte: Autoria própria.

3.10 MEDIÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA

Para avaliação do desgaste da ferramenta de corte foi utilizado um microscópio digital (Fotografia 7 a), marca Dino-Lite, modelo AM-413T, acoplado em

um microcomputador, as Fotografias tiradas tiveram ampliação de 205x. A observação e medição dos desgastes foram feitos no software Dino Capture 2.0.

A fim de facilitar e obter um melhor posicionamento da ferramenta foram construídos dois suporte (Fotografia 7 b) para tirar as Fotografias da ferramenta, o material utilizado para confeccionar tais suportes foi o MDF (*Medium Density Fiberboard*- placa de fibra de média densidade).



Fotografia 7 - Equipamentos para fotografar o desgaste da ferramenta: (a) microscópio, (b) suportes
Fonte: Autoria própria.

A Fotografia 8 apresenta um exemplo de uma Fotografia tirada no microscópio digital e a medida do desgaste feita no software Dino capture.



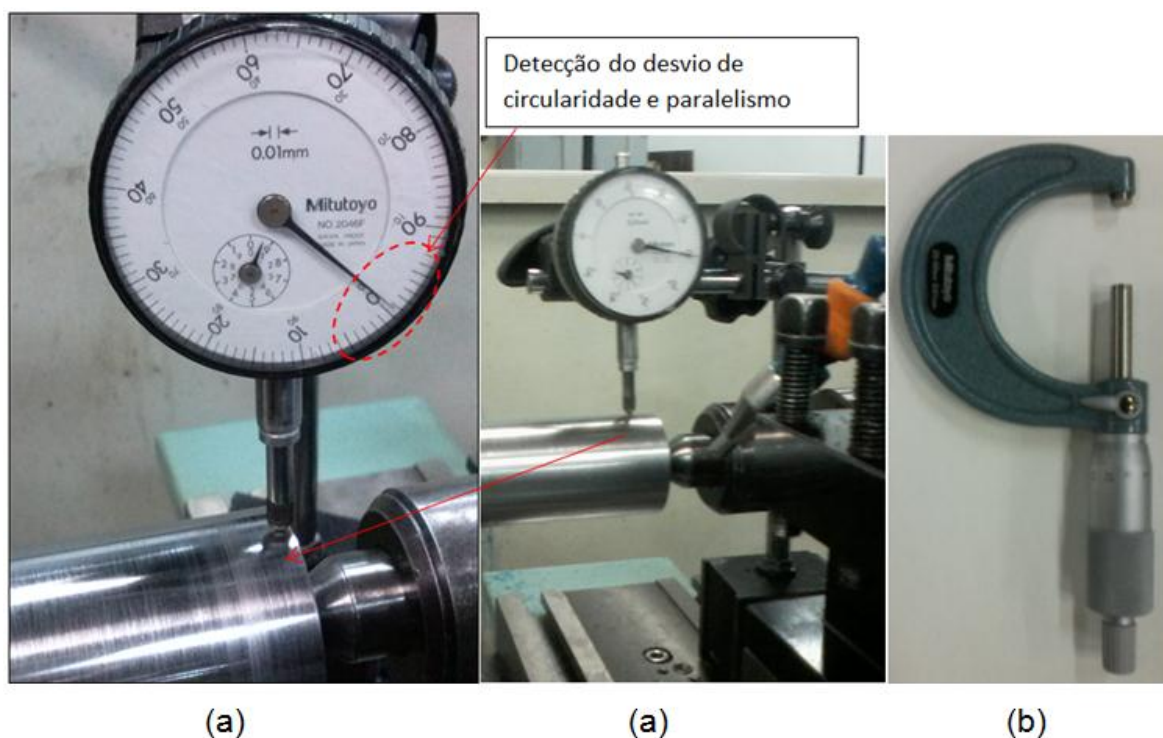
Fotografia 8 - Fotografia de desgaste de franco da ferramenta de corte de torneamento (205 x)
Fonte: Autoria própria.

As Fotografias dos cavacos também foram tiradas com o microscópio, citado acima.

3.11 MEDIÇÃO DOS DESVIOS DIMENSIONAL, DE FORMA E DE POSIÇÃO

Para medição do desvio dimensional (diâmetro da peça) foi utilizado um micrômetro (Fotografia 9 b) da marca Mitutoyo, com resolução centesimal (0,01mm). O desvio de forma (circularidade) e desvio de posição (paralelismo), foram medidos com o relógio comparador (Fotografia 9 a) da marca Mitutoyo, com resolução centesimal (0,01mm).

Para cada réplica do experimento foram realizados cinco medições de cada desvio, tomados de forma aleatória e destas cinco medições foi feito uma média para representar a medição final (Valores no apêndice C).



Fotografia 9 - Instrumentos de medição dos desvios: (a) relógio comparador (b) Micrômetro
Fonte: Autoria própria.

3.12 MEDIÇÃO DE DUREZA (HRB)

Outra medição realizada nos corpos de prova foi a dureza do material tanto antes como depois da usinagem, com o objetivo de conferir a homogeneidade dos corpos de prova. A medição foi realizada em um durômetro (Fotografia 10) marca Pantec, modelo RBS-M. Utilizou-se a escala de dureza Rockwell B (HRB), carga maior de 100 Kgf e penetrador de esfera de aço.

Não houve variação significativa da dureza dos corpos de prova antes e depois da usinagem e nem em corpos de provas diferentes. A média da dureza encontrada foi de 87,5 HRB.



Fotografia 10 - Durômetro Pantec modelo RBS-M
Fonte: Autoria própria.

3.13 MEDIÇÃO DAS ROSCAS

A medição dos diâmetros das roscas foi realizada no projetor de perfis (Fotografia 11) do laboratório de metrologia. O medidor de perfil utilizado foi da marca Pantec modelo CPJ – 3015J com ampliação de 10X.




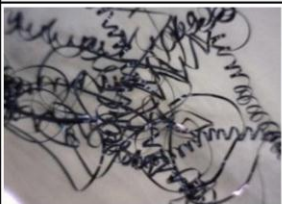
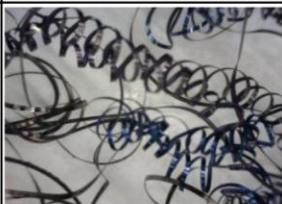


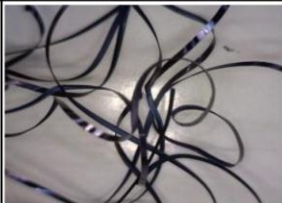



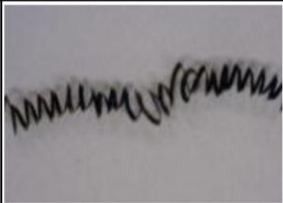








Fotografia 11 - Medidor de perfil Pantec
Fonte: Autoria própria.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram analisadas diversas variáveis respostas, em cada velocidade de corte, avanço e meio de lubrificação/refrigeração de acordo com a metodologia de planejamento de experimentos empregada. Os resultados para cada resposta são apresentados a seguir, a representação destes resultados será feita por meio de Gráficos, com os respectivos valores da média das repetições e seus desvios padrão. Os Quadros com os valores das medidas realizadas, que foram cinco para cada ensaio, a média das medidas e o valor de cada repetição utilizados para calcular os resultados de cada resposta que constam nos referidos Gráficos a seguir estão no apêndice C.

4.1 ANÁLISE DO CAVACO

Na Fotografia 12 são apresentadas as Fotografias dos cavacos obtidos no torneamento.

Cavacos obtidos no torneamento a seco			
Avanço	Velocidade de corte		
	125 m/min	157 m/min	196 m/min
Avanço 0,05 mm/rev			
Avanço 0,1 mm/rev			
Cavacos obtidos no torneamento com jorro de fluido abundante			
Avanço	Velocidade de corte		
	125 m/min	157 m/min	196 m/min
Avanço 0,05 mm/rev			
Avanço 0,1 mm/rev			
Cavacos obtidos no torneamento com MQL			
Avanço	Velocidade de corte		
	125 m/min	157 m/min	196 m/min
Avanço 0,05 mm/rev			
Avanço 0,1 mm/rev			

Fotografia 12 - Cavacos obtidos no torneamento nos três meios lubri-refrigerante
 Fonte: Autoria própria.

No Quadro 4 são apresentadas as classificações dos cavacos quanto ao tipo, forma e coloração no torneamento.

Classificação dos cavacos no torneamento					
Meio de lubr./refr.	Avanço	Velocidade de corte	Classificação do cavaco		
			Tipo	Forma	Coloração
Seco	0,05 mm/rev	125 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela longo	Azul escuro
		157 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela emaranhado	Azul escuro
		196 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela emaranhado	Azul escuro
	0,1 mm/rev	125 m/min	Contínuo	Em fita emaranhado	Azul escuro
		157 m/min	Contínuo	Em fita emaranhado	Azul escuro
		196 m/min	Contínuo	Em fita emaranhado	Azul escuro
Jorro abundante	0,05 mm/rev	125 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela curto	Prata escuro
		157 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela curto	Prata escuro/ Dourado escuro
		196 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela emaranhado	Cobre/ azul escuro
	0,1 mm/rev	125 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela longo	Cobre/ azul escuro
		157 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela longo	Cobre/ azul escuro
		196 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela longo	Cobre/ azul escuro
MQL	0,05 mm/rev	125 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela longo	Cobre

		157 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela emaranhado	Azul escuro
		196 m/min	Contínuo	Helicoidal tipo arruela emaranhado	Azul escuro
	0,1 mm/rev	125 m/min	Contínuo	Em fita emaranhado	Azul escuro
		157 m/min	Contínuo	Em fita emaranhado	Azul escuro
		196 m/min	Contínuo	Em fita emaranhado	Azul escuro

Quadro 4 - Classificação dos cavacos no torneamento
Fonte: Autoria própria.

A classificação da forma do cavaco foi realizada de acordo com a norma ISO 3685 (1993) citada por Machado, seção 2.4.2, pág.37.

Observa-se no Quadro 4 que o tipo de cavaco obtido no processo de torneamento foi somente cavaco contínuo, em fator do material que se usinou, aço SAE 1045, e parâmetros de usinagem utilizados.

“Os cavacos contínuos ocorrem em materiais dúcteis e homogêneos, como os aços, aços forjados, de baixa liga, na usinagem de cobre e alumínio, tanto em baixo quanto médio avanço e em altas velocidades” (SILVA, SILVA, 2006, p.1).

Quanto a forma do cavaco houve várias mudanças com as alterações dos parâmetros de usinagem.

Na usinagem a seco foram observados os seguintes resultados: no avanço de 0,05 mm/rev foi obtido a forma helicoidal tipo arruela longo na velocidade de 125 m/min, já em velocidade maiores, 157 e 196 m/min, a forma do cavaco mudou para helicoidal tipo arruela emaranhado.

De acordo com Yamakami et al. ([2006?], p.2) o aumento da velocidade de corte promove um aumento na taxa de cisalhamento do material e conseqüentemente eleva a temperatura na zona de corte. E segundo Zeilmann e Vacaro (2008, p.182) as temperaturas de usinagem mais altas têm muita influência na formação dos cavacos e pode resultar na formação de cavacos em forma de tiras (fitas) ou emaranhados.

No avanço de 0,1 mm/rev a forma resultante foi cavaco em fita emaranhado para todas as velocidades de corte. Observa-se a grande influência do avanço na forma do cavaco que mudou de helicoidal para cavaco em fita.

“O avanço e, principalmente, o material da peça, são os fatores que mais influenciam na forma do cavaco” (SILVA; SILVA, 2006, p.2).

Na usinagem com jorro de fluido abundante houve mudança das formas de cavacos em relação a usinagem a seco em quase todas as velocidades de corte e avanços. No avanço de 0,05 mm/rev para as velocidades de 125 e 157 m/min foi observado cavaco helicoidal tipo arruela curto, as mudanças ocorridas em relação a usinagem a seco foi helicoidal tipo arruela longo para helicoidal tipo arruela curto na velocidade de 125 m/min e helicoidal tipo arruela emaranhado para helicoidal tipo arruela curto na velocidade de 157 m/min. Na velocidade de 196 m/min não houve alteração da forma, manteve helicoidal tipo arruela emaranhado. No avanço de 0,1 mm/rev a mudança ocorrida da usinagem a seco para jorro de fluido abundante foi cavaco em fita emaranhado para helicoidal tipo arruela longo para todas as velocidades de corte.

Novamente é possível observar a influência do avanço na forma do cavaco nos testes com jorro de fluido abundante, no avanço de 0,05 mm/rev como já citado foram obtidos cavacos helicoidal tipo arruela curto e emaranhado, a mudança do avanço para 0,1 mm/rev mudou a forma do cavaco para helicoidal tipo arruela longo.

A usinagem com fluido de corte apresenta características como melhor desempenho no mecanismo da formação do cavaco e maior facilidade de expulsão do mesmo na região de corte (BORNHOLD et al., 2011,p.2).

Na usinagem com MQL não houve nenhuma mudança da forma do cavaco em relação a usinagem a seco.

Outra característica analisada do cavaco foi a sua coloração.

Na usinagem a seco a cor do cavaco para todas as velocidades de corte e avanços foi azul escuro.

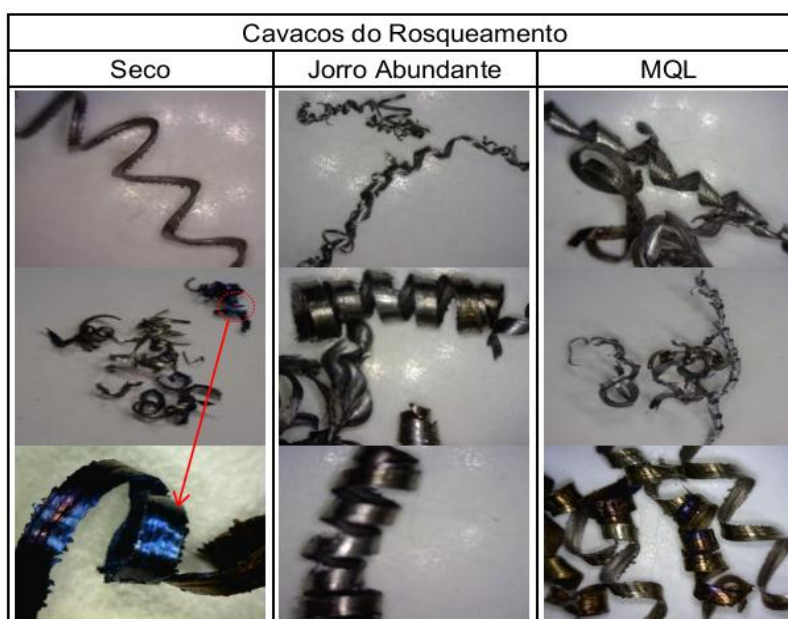
A coloração azulada indica alta geração de calor entre a peça e a ferramenta. Tal ocorrência se explica à alta taxa de cisalhamento do material e, conseqüentemente elevação da temperatura na zona de corte (YAMAKAMI et al., [2006?], p.2.).

Com jorro de fluido abundante houve uma diversidade da coloração dos cavacos. No avanço de 0,05 mm/rev na velocidade de 125 m/min a cor observada

foi prata escuro, na velocidade de 157 m/min prata escuro e dourado escuro e na velocidade de 196 m/min cobre e azul escuro. No avanço de 0,1 mm/rev a cor dos cavacos para todas as velocidades de corte foram cobre e azul escuro. Observa-se comparando os dois avanços trabalhados que eles exerceram influência na coloração do cavaco, e no avanço de 0,05 mm/rev a velocidade de corte teve efeito, o que não aconteceu na usinagem a seco. A coloração mais escura no avanço de 0,1 mm/rev e na maior velocidade no avanço de 0,05 mm/rev indica maior geração de calor e elevação da temperatura nesses parâmetros.

Com a MQL a única diferença observada em relação a usinagem a seco foi na velocidade de 125 m/min no avanço de 0,05 mm/rev que teve cor cobre, os demais parâmetros obtiveram cavacos cor azul escuro. Acredita-se que apenas esta condição obteve coloração diferente, pois por ser a menor velocidade de corte no avanço mais lento, houve menor aquecimento durante o corte do material que ainda foi reduzida pela maior quantidade de lubrificante que adentrou a interfase peça-ferramenta – cavaco, já que a vazão do fluido era a mesma para todas as velocidades de corte e avanço.

A Fotografia 13 apresenta os cavacos obtidos no processo de rosqueamento.



Fotografia 13 - Cavacos do rosqueamento nos diferentes meios de lubrificação/refrigeração

Fonte: Autoria própria.

No Quadro 5 são apresentados os resultados da classificação dos cavacos no rosqueamento.

Classificação dos cavacos obtidos no rosqueamento			
Classificação do cavaco	Meio de lubrificação/refrigeração		
	Seco	Jorro Abundante	MQL
Tipo	Contínuo/ruptura	Contínuo/ruptura	Contínuo/ruptura
Forma	Helicoidal tipo arruela curto/Em arco conectado	Tubular curto/ Em arco conectado	Helicoidal cônico/ Tubular curto/ Em arco conectado
Coloração	Prata escuro/Azul escuro	Prata escuro	Prata escuro/ Dourado escuro

Quadro 5 - Classificação dos cavacos no rosqueamento

Fonte: Autoria própria.

Os tipos de cavacos coletados no rosqueamento foram cavacos contínuos e cavacos de ruptura, nota-se que no rosqueamento apareceu um novo tipo de cavaco em relação ao torneamento, por se tratar de um processo de usinagem diferente.

De acordo com Yamakami ([2006?], p.2) a presença de cavaco de ruptura é característico das condições de usinagem onde há maiores taxas de cisalhamento.

Por ter mais de um tipo de cavaco em cada parâmetro do rosqueamento, foram observadas mais de uma forma de cavaco para cada parâmetro. Nos cavacos de ruptura para todos os meios de lubrificação/refrigeração a forma observada foi cavaco em arco conectado. Nos cavacos contínuos na usinagem a seco a forma resultante foi cavaco helicoidal tipo arruela curto, no jorro abundante cavaco tubular curto e na MQL helicoidal cônico e tubular curto.

Nota-se que o meio de lubrificação/refrigeração exerceu grande influência na forma do cavaco no processo de rosqueamento.

Quanto a coloração do cavaco no rosqueamento o meio de lubrificação/refrigeração também teve efeito. No rosqueamento a seco as cores dos cavacos foram prata escuro e azul escuro, com jorro abundante a cor dos cavacos foi apenas prata escuro e com MQL prata escuro e dourado escuro.

A tendência da mudança de cor do cavaco para o processo de rosqueamento com a mudança do meio de lubrificação/refrigeração é parecida com

a tendência observada no torneamento nas menores velocidades de corte e menor avanço.

4.2 DESGASTE E AVARIAS DA FERRAMENTA DE CORTE

Uma questão muito importante a ser salientada antes de apresentar os resultados dos desgastes da ferramenta de corte é que este trabalho não objetivou determinar a vida da ferramenta de corte nos parâmetros de corte utilizados. O objetivo em medir e analisar o desgaste da ferramenta foi fazer uma avaliação do comportamento da ferramenta frente aos meios de lubrificação/refrigeração e fazer uma estimativa de qual meio de lubrificação/refrigeração a ferramenta desgastou mais e qual a ferramenta desgastou menos, ou seja, qual resultaria se fosse feito um teste normalizado de vida da ferramenta, em menor e maior vida da ferramenta de corte. A causa para esta forma de avaliação do desgaste da ferramenta foi a grande quantidade de combinações que resultou dos parâmetros utilizados e da metodologia de planejamento de experimento fatorial empregada, já que o trabalho tinha objetivo avaliar a influência dos meios de lubrificação nos parâmetros ensaiados.

De acordo com a justificativa dada anteriormente um teste normalizado de vida da ferramenta de corte demandaria muito mais material e muito mais tempo, fugindo do cronograma e recursos disponíveis para este trabalho.

Nos Gráficos a seguir, que mostra os resultados para o desgaste da ferramenta de corte, os valores representam uma média do desgaste obtido nas três repetições de cada combinação dos parâmetros e a barra de erro representa o desvio padrão entre as réplicas. No entanto para cada meio de lubrificação/refrigeração foi utilizado a mesma aresta de corte na maior parte dos ensaios, a obtenção de cada desgaste individual foi obtido a partir de uma subtração dos desgastes acumulados a cada ensaio.

4.2.1 Desgaste de flanco e avarias da ferramenta de corte do torneamento

Esta seção apresentará os resultados para o desgaste de flanco e avarias na ferramenta de corte de torneamento. Relembrando que para o torneamento foi utilizado um inserto de metal duro, descrito no item 3.5, pág. 63.

Outro detalhe a ser lembrado é que cada ensaio usinou a mesma quantidade de material, ou seja, seis passes em cada réplica, detalhes na seção 3.1, pág. 58.

No Gráfico 1 são apresentados os valores de desgaste da ferramenta de corte de torneamento para os ensaios realizados sem uso de lubrificação/refrigeração.

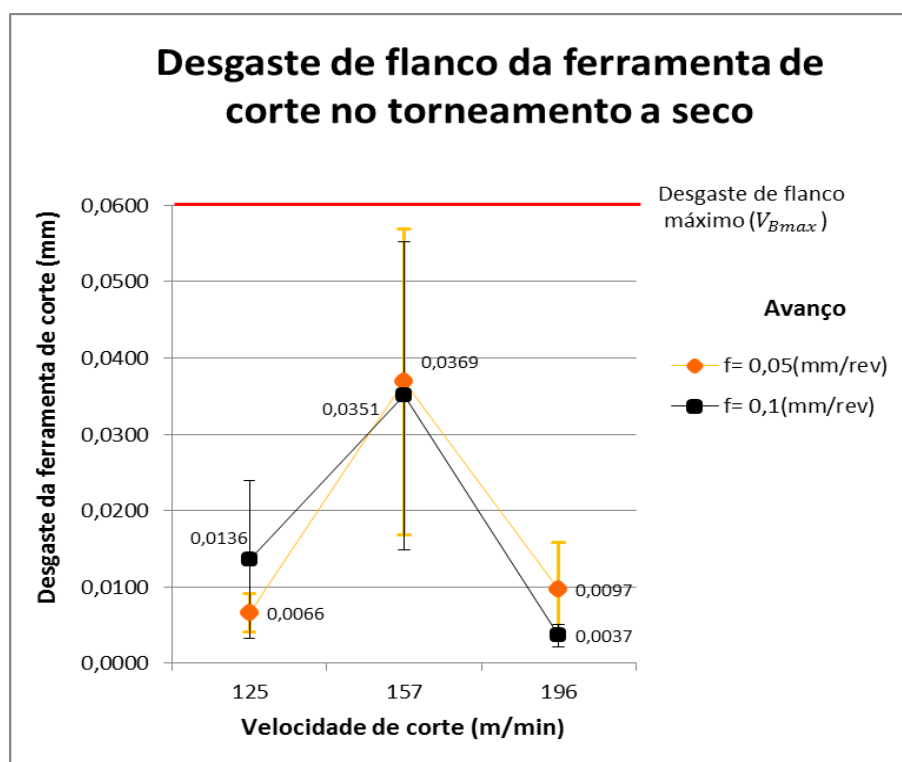
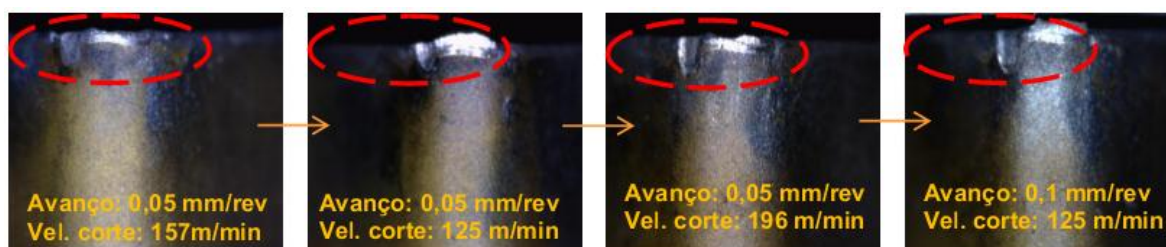


Gráfico 1 - Desgaste da ferramenta de corte e barra de desvio padrão para os ensaios sem uso de meio lubrificante/refrigerante

Fonte: Autoria própria.

A observação a ser feita quanto aos parâmetros empregados nos testes a seco foi que na velocidade de 157m/min tanto para o avanço de 0,05 mm/rev quando para o de 0,1 mm/rev o desgaste da ferramenta foi maior.

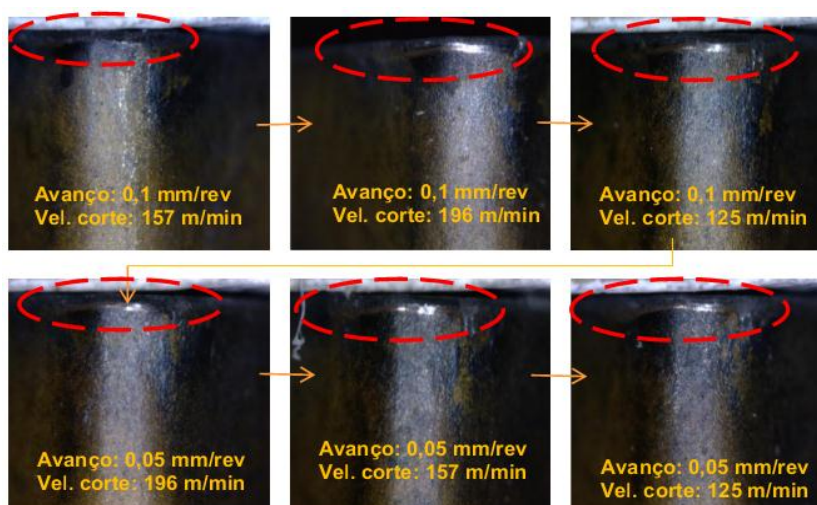
As Fotografias 14 e 15 mostram os detalhes da evolução dos desgastes de flanco e avarias da aresta de corte da ferramenta utilizada nos ensaios de torneamento a seco. A Fotografia 14 apresenta a primeira aresta de corte utilizada. Porém por ocorrer uma avaria nesta, um lascamento que se agravou, foi necessário utilizar uma nova aresta de corte (Fotografia 15), e refazer os ensaios realizados com a aresta anterior para comprovar e validar os resultados. Os valores dos resultados apresentados neste trabalho são referentes aos ensaios realizados com a segunda aresta.



Fotografia 14 - Detalhes do desgaste e avaria da primeira aresta da ferramenta de corte de torner para o teste sem lubrificação

Fonte: Autoria própria.

As setas presentes nas imagens indicam a sequência em que os ensaios foram realizados.



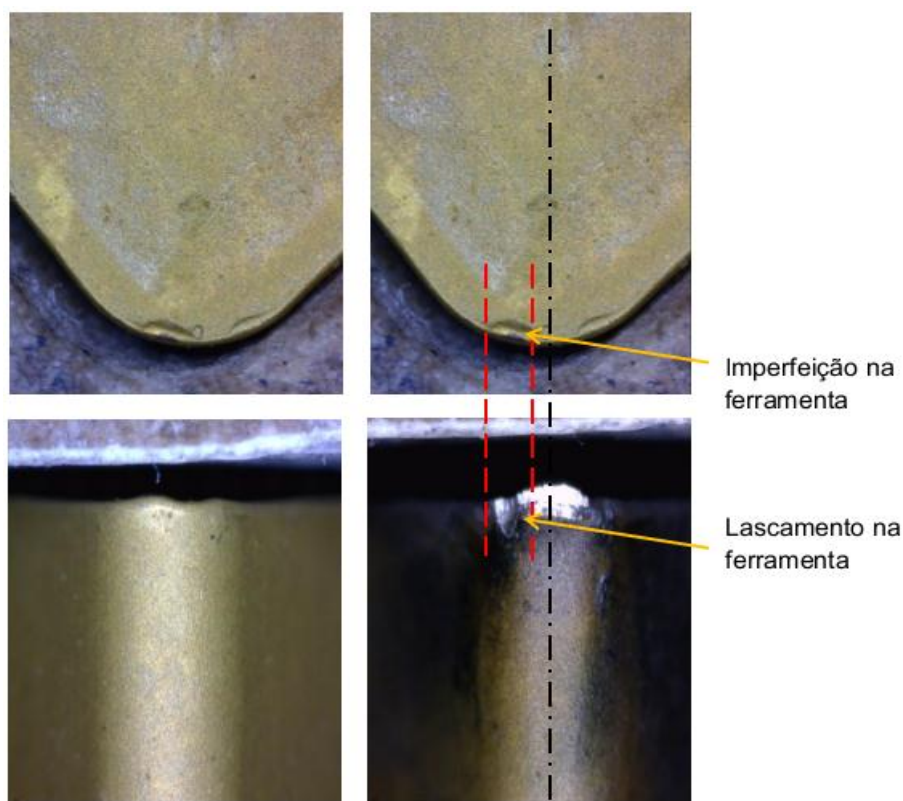
Fotografia 15 - Detalhes do desgaste da segunda aresta da ferramenta de corte de torner para o teste sem lubrificação

Fonte: Autoria própria.

As avarias na ferramenta nos processos de corte contínuo ocorrem de acordo com Amorin (2002, p.16) quando as condições de corte excedam as recomendadas ou a ferramenta possui algum defeito de fabricação.

Segundo Stemmer (1995, p.129) um fator que pode ocasionar a perda da resistência da aresta de corte é o mau acabamento do gume.

A partir dessas ideias foi investigado possível imperfeição no gume da ferramenta, foi então analisada uma Fotografia obtida antes de inicializar os testes e foi detectada uma pequena imperfeição na aresta, conforme representado na Fotografia 16.



Fotografia 16 - Ferramenta nova com imperfeição e lascamento da aresta de corte
Fonte: Autoria própria.

Deduz-se que esta imperfeição pode ter sido um fator que tenha ajudado a ocorrência do lascamento, já que quando os testes foram refeitos com outra aresta não ouve mais o lascamento.

No Gráfico 2 são apresentados os valores de desgaste de flanco da ferramenta de corte de torneamento para os ensaios realizados com uso de fluido de corte com jorro abundante.

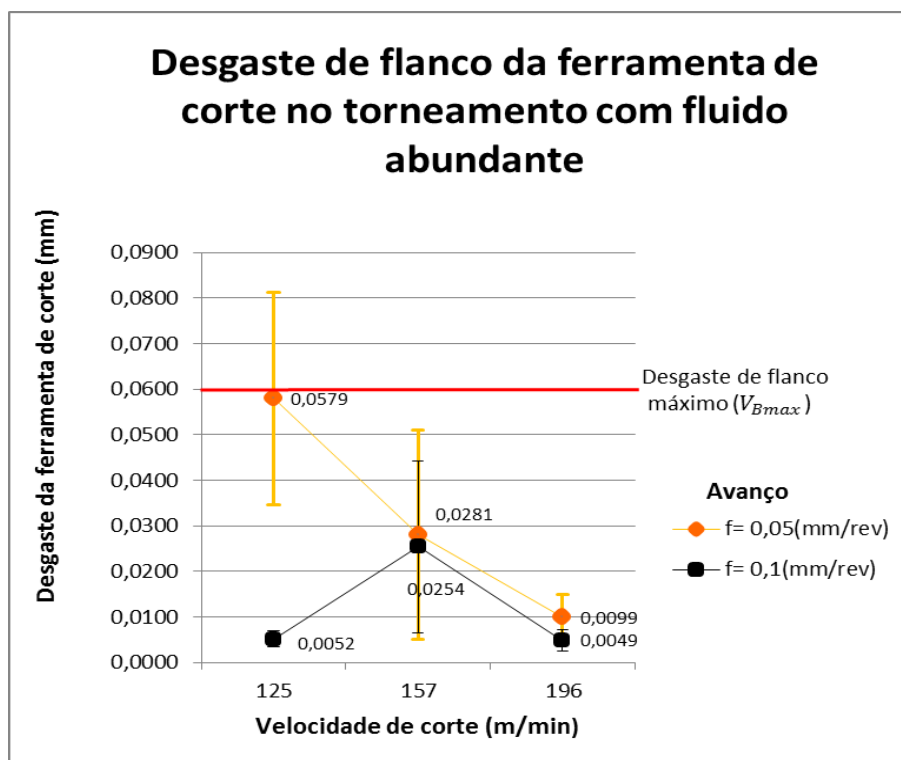
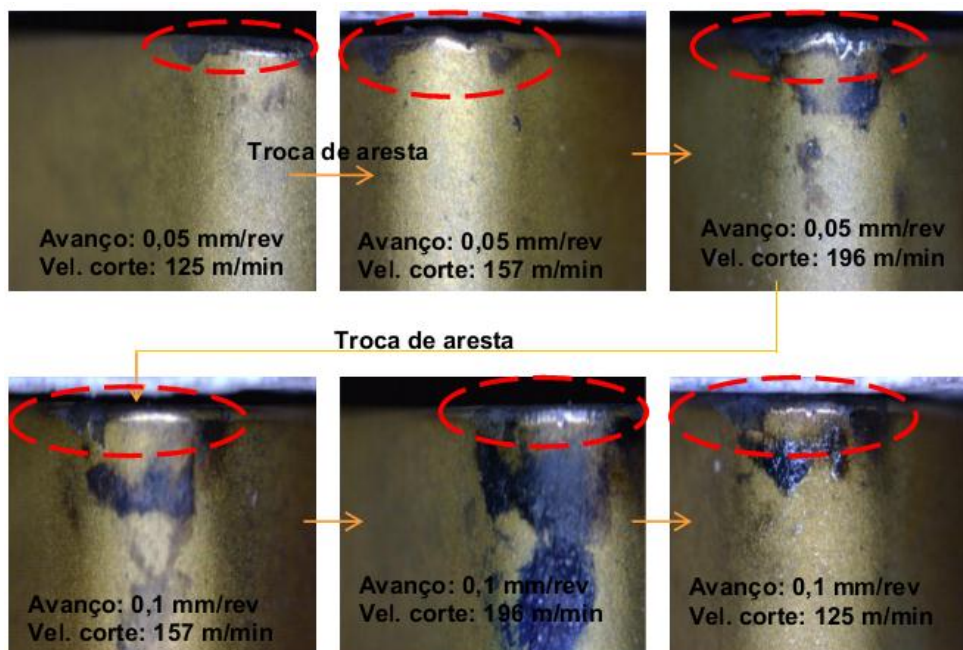


Gráfico 2 - Desgaste da ferramenta de corte e barra de desvio padrão para os ensaios realizados com jorro de fluido abundante

Fonte: Autoria própria.

Observações a serem feitas sobre o Gráfico do desgaste de flanco no torneamento com uso de fluido com jorro abundante é que neste meio de lubrificação/refrigeração a ferramenta se desgastou mais no avanço de 0,05 mm/rev e nas velocidades de 125m/min e 157 m/min.

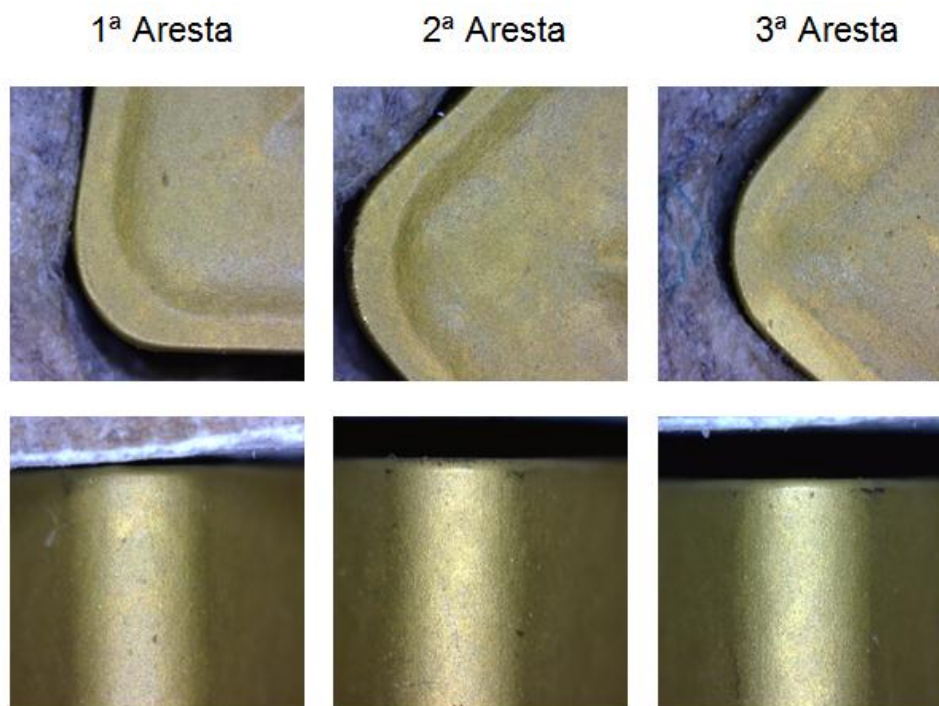
Na Fotografia 17 são apresentados os detalhes do desgaste de flanco e avarias da aresta de corte da ferramenta de torneamento utilizando jorro de fluido abundante.



Fotografia 17 - Desgastes e avarias das ferramentas utilizadas no torneamento com jorro de fluido abundante
Fonte: Autoria própria.

Como indicado na Fotografia 17, foi trocado no torneamento com jorro de fluido abundante a aresta de corte duas vezes. O motivo para troca da aresta foi a frequente ocorrência de lascamentos, portanto todas as vezes que foi posto uma aresta nova houve o lascamento, o que nos leva a dedução de que a combinação destes parâmetros, o uso de fluido abundante com estas velocidades de corte e avanço, não é ideal para esta ferramenta de corte.

O lascamento ocorrido no corte a seco estava relacionado a defeito na aresta de corte, o que não é o caso neste meio de lubrificação/refrigeração percebido através de Fotografias que as arestas estavam perfeitas (Fotografia 18).



Fotografia 18 - Arestas novas utilizadas no torneamento com jorro de fluido abundante

Fonte: Autoria própria.

A causa desses lascamentos pode estar relacionada aos choques térmicos sofridos pela ferramenta durante as operações de corte e ao resfriamento que deixou o material mais duro, exigindo maior esforço da ferramenta.

O uso do fluido aumenta a variação térmica e, portanto, aumenta a probabilidade de ocorrência de trincas e lascamentos do gume da ferramenta (LIAO, 2007; LIEW, 2008; STANFORD, 2007 apud ZEILMANN et al.2009, p.2).

Segundo Ramos, (2002 apud OLIVEIRA; MESQUITA; YADAVA, [2007], p.4) uma das vantagens para a renúncia aos fluidos de corte em relação a ferramenta de corte são a redução do choque térmico, redução das trincas e lascamentos.

Há casos em que a geração de calor favorece a usinagem, pois o calor gerado promove o amolecimento do material, e o fluido pode impedir este amolecimento (PROJETO PROGRAMA PILOTO PARA A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS POR RESÍDUOS PERIGOSOS, 2006, p.32).

No Gráfico 3 são apresentados os valores de desgaste de flanco da ferramenta de corte de toronar para os ensaios realizados com MQL

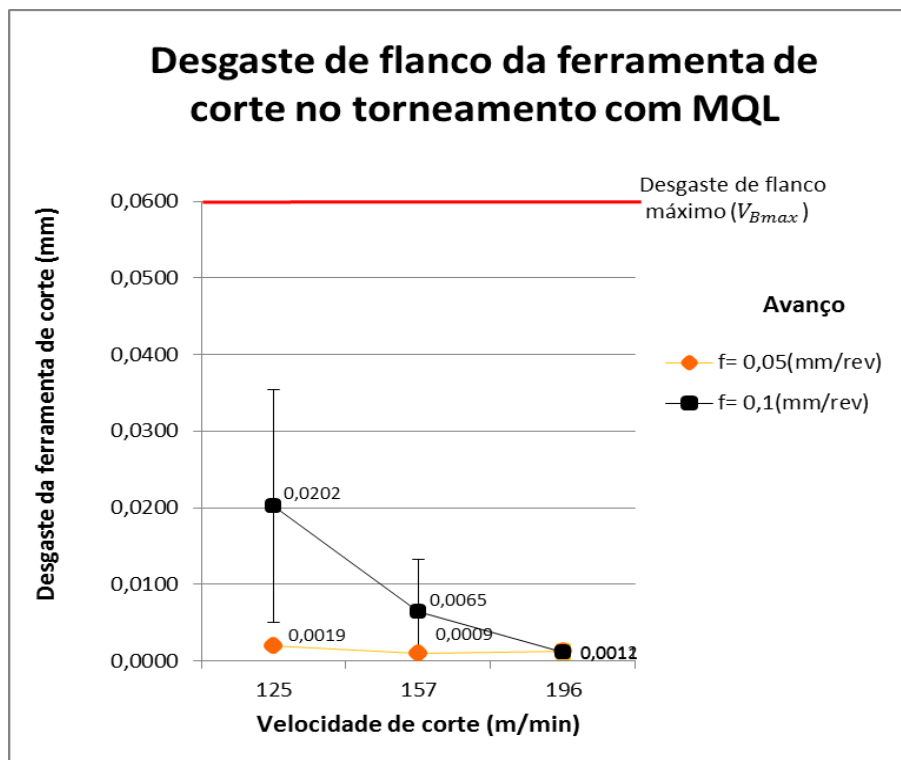
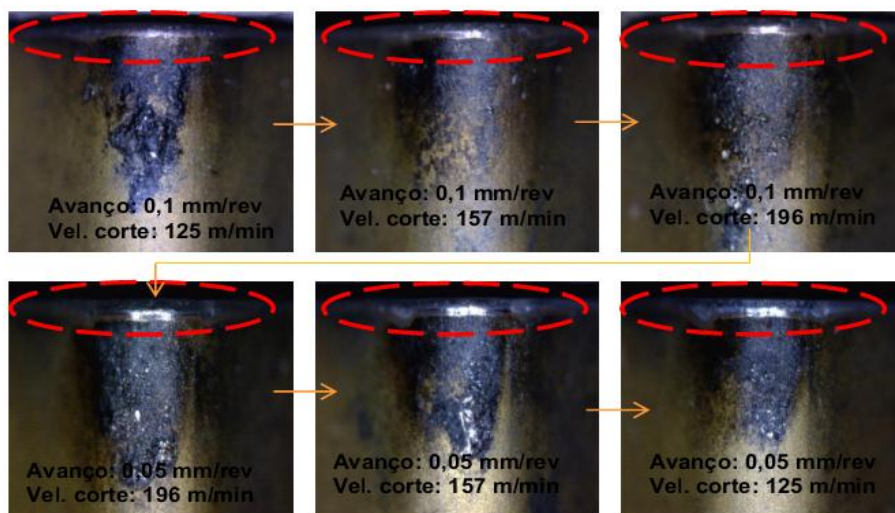


Gráfico 3 - Desgaste individual para cada parâmetro da ferramenta de corte e barra de desvio padrão para os ensaios realizados com MQL
Fonte: Autoria própria.

Observa-se no Gráfico 3 que no torneamento com MQL o parâmetro que apresentou maior desgaste foi o avanço de 0,1 mm/rev nas velocidades de corte de 125 m/min e 157 m/min.

Os detalhes da evolução do desgaste de flanco da ferramenta de corte no torneamento com MQL estão representadas na Fotografia 19.



Fotografia 19 - Detalhes do desgaste da ferramenta utilizada no torneamento com MQL

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Fotografia 19 que a lubrificação com MQL não trouxe nenhum inconveniente como na lubrificação/refrigeração por meio do jorro abundante que provocou lascamento na ferramenta. Utilizou-se apenas uma aresta de corte para a realização de todos os ensaios neste meio de lubrificação.

O Gráfico 4 apresenta os valores finais de desgaste de flanco em cada aresta de corte utilizada.

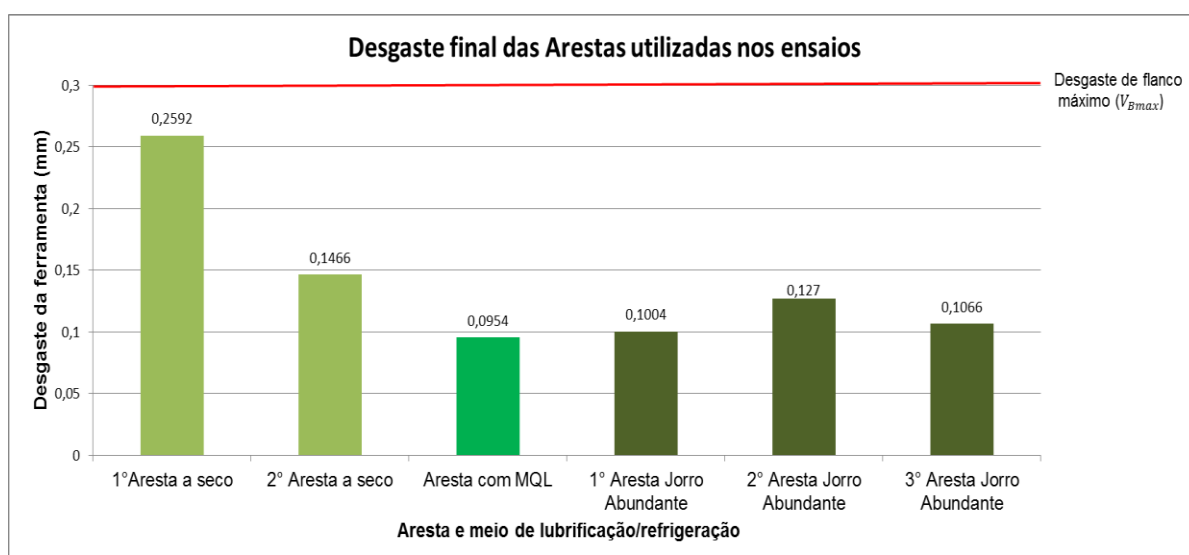
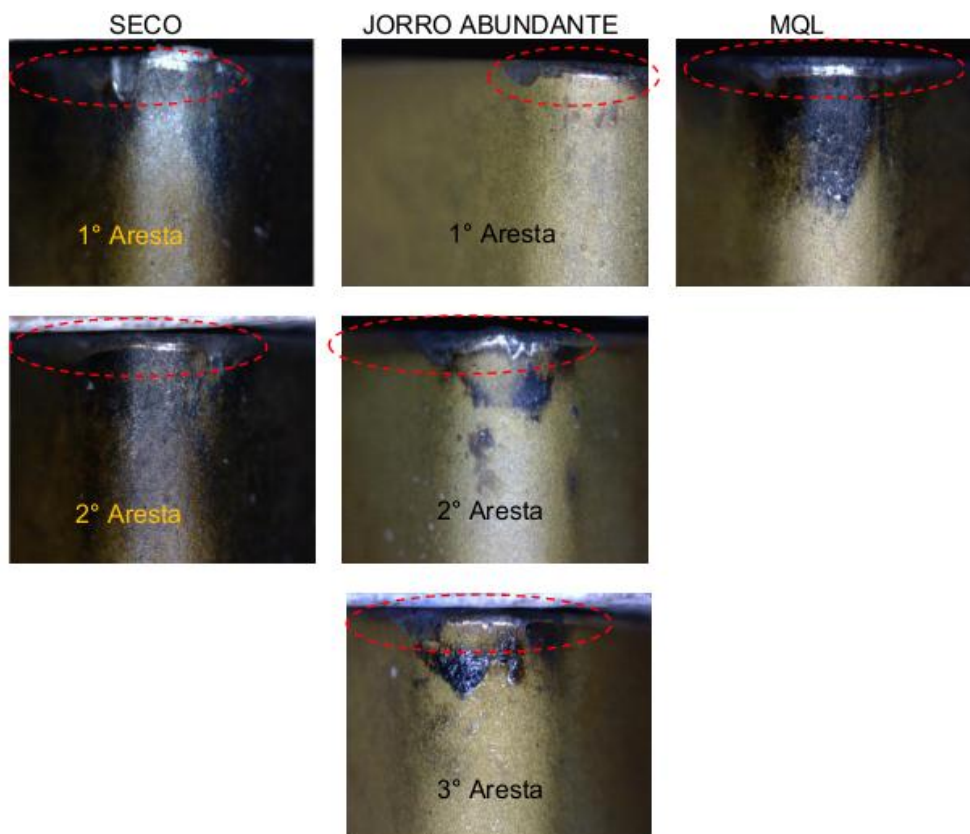


Gráfico 4 – Desgaste de flanco da aresta de corte nos meios de lubrificação/refrigeração no torneamento

Fonte: Autoria própria.

A Fotografia 20 ilustra o desgaste de flanco final das seis arestas de corte referentes ao Gráfico 4.



Fotografia 20 - Detalhes do desgaste e avarias das ferramentas de corte
Fonte: Autoria própria.

Observa-se pelo Gráfico 4 e Fotografia 20 que o meio de lubrificação que a ferramenta apresentou maiores desgaste foi o jorro abundante, pois para os seis testes realizados foram utilizadas três arestas de corte e todas apresentaram desgaste acima de 0,1 mm, se os desgaste de flanco dessas três arestas fossem somadas resultariam no maior desgaste em relação aos outros meios de lubrificação/refrigeração utilizados.

A causa do maior desgaste de flanco no torneamento com jorro de fluido abundante esta relacionado aos lascamentos ocorridos, que foram retirando maiores quantidades de material da ferramenta do que no desgaste normal.

No lascamento partículas grandes da ferramenta são retiradas de uma só vez (Espanhol, 2008, p.11).

Na usinam a seco a primeira aresta apresentou um alto desgaste de flanco, ainda que não foram realizados todos os testes previsto no torneamento a seco com ela. Portanto por haver lascamento nela que acelerou o desgaste, os testes foram refeitos com a segunda aresta, e descartado os resultados da primeira por ser constatada uma imperfeição de fabricação nessa aresta. Na segunda aresta de corte no torneamento a seco depois de realizados todos os testes previstos, o desgaste de flanco foi menor que na primeira aresta, aquela que havia lascado.

O torneamento com MQL apresentou o melhor desempenho para ferramenta. Depois de usinado todos os parâmetros para este meio de lubrificação, a aresta apresentou um desgaste de flanco de apenas 0,0954 mm, o menor entre todas as arestas de corte.

Segundo Diniz et al. (2008, p.113) os mecanismos causadores de desgaste são:

- Abrasão: que é o atrito entre a aresta de corte da ferramenta e a superfície usinada ou a superfície de saída da ferramenta e o cavaco;
- Difusão: é a transferência de átomos de um material a outro;
- Oxidação: ocorre em altas temperaturas e presença de ar e água nos fluidos de corte;
- Aderência: é a formação de um extrato metálico entre duas superfícies que estão em contato e na tentativa de separa-la ocorre a ruptura em um dos materiais.

O desgaste de flanco é geralmente atribuído ao atrito da ferramenta com a superfície usinada, gerando um desgaste por abrasão e/ou aderência (KUMAR 2006 apud OLIVEIRA; MESQUITA; YADAVA, 2014, p.4).

Os mecanismos de abrasão e adesão são predominantes na formação do desgaste de flanco (ZEILMANN; VACARO, 2008, p.184).

O menor desgaste observado na condição MQL foi a redução do desgaste por abrasão e adesão pela película de lubrificação obtida com as mínimas quantidades de óleo.

No MQL as quantidades mínimas de fluido foram suficientes para reduzir substancialmente o atrito na ferramenta e evitar a aderência no material (PAULA, 2007, p.2).

Neste meio de lubrificação a redução do atrito, diminui a carga térmica sobre a ferramenta, ao mesmo tempo em que é aproveitado o efeito positivo do calor na região de corte para diminuir a resistência ao cisalhamento do material, reduzindo os esforços mecânicos necessários ao corte (ZEILMANN et al., [2009?], p.6).

Uma dedução atrevida a se tirar ao analisar o Gráfico 4 e a Fotografia 20 é que a usinagem com MQL resulta em maior vida para esta ferramenta utilizada nestes testes, seguida pela usinagem a seco e a menor vida o torneamento com jorro abundante, isso para as condições de corte (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte) utilizadas. Portanto como foi utilizada a mesma aresta em velocidades de corte e avanços diferentes ainda pode ocorrer um comportamento diferente ao variar estes parâmetros quando usinado maior quantidade de material até a ferramenta alcançar um desgaste de flanco médio de 0,3 mm, previsto em teste normalizado de vida da ferramenta (seção 2.5.3, pág. 41).

4.2.2 Desgaste de flanco e avarias da ferramenta de corte do rosqueamento

O Gráfico 5 mostra os valores de desgaste de flanco para o processo de rosqueamento nos diferentes meios de lubrificação/refrigeração, esses valores correspondem uma média do desgaste obtido no ensaio e réplicas e a barra de erro representa o desvio padrão.

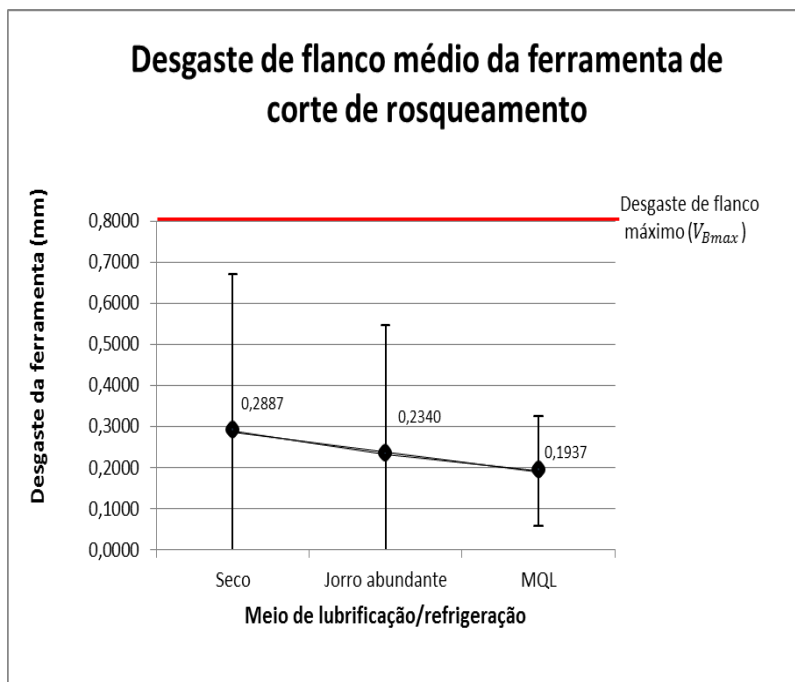


Gráfico 5 - Média entre as repetições do desgaste de flanco da ferramenta de corte de rosqueamento
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 6 apresenta o desgaste da ferramenta de corte no rosqueamento ao final das três repetições para cada meio de lubrificação/refrigeração utilizados.

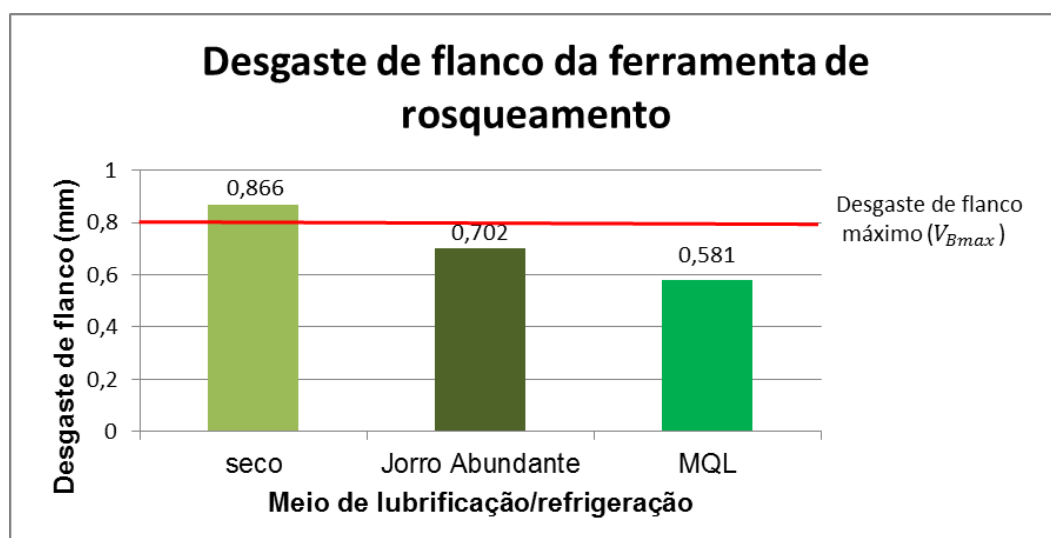


Gráfico 6 - Desgaste da ferramenta de rosqueamento ao final das repetições
Fonte: Autoria própria.

Na Fotografia 21 estão apresentadas as ferramentas utilizadas no rosqueamento e mostra os detalhes do desgaste de flanco ao final das três repetições para cada meio de lubrificação/refrigeração.



Fotografia 21 - Detalhes do desgaste da ferramenta de rosqueamento
Fonte: Autoria própria.

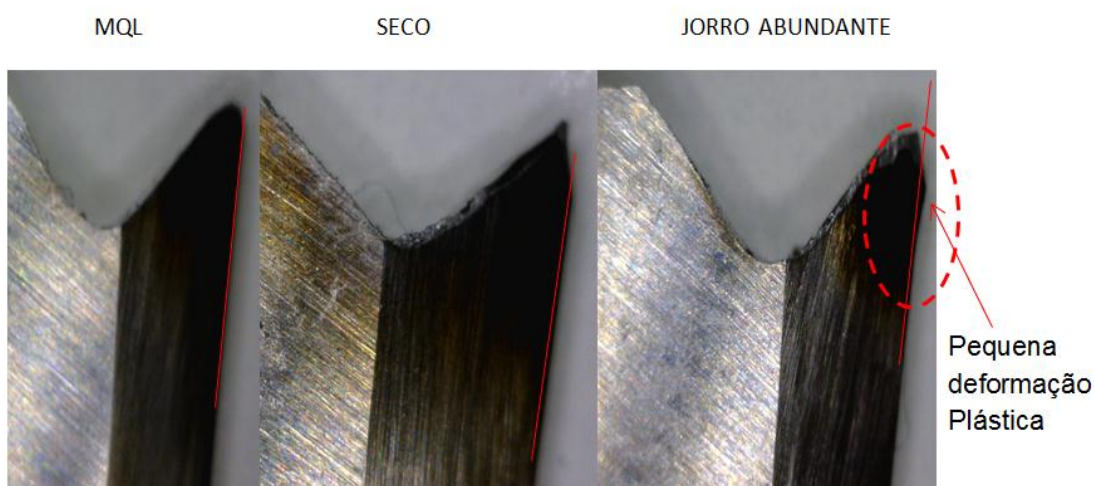
Nota-se a partir da análise dos Gráficos 5, 6 e Fotografia 21 que o maior desgaste de flanco da ferramenta de corte no rosqueamento ocorreu na usinagem sem uso de lubrificação/refrigeração. O menor desgaste foi obtido com a MQL e a usinagem com jorro de fluido abundante apresentou um valor intermediário.

O menor desgaste da ferramenta com a utilização do jorro abundante e com MQL pode estar relacionado ao menor atrito da interfase ferramenta e peça provocado pela lubrificação, o MQL que possui um efeito lubrificante maior apresentou melhor resultado assim como no torneamento.

A utilização de fluido de corte apresenta como principal objetivo a diminuição do atrito e das condições elevadas de temperatura, resultantes do processo de usinagem. Se for colocada uma camada de lubrificante entre duas superfícies, impediremos o contato entre elas. A retirada desse contato, evita durante o movimento, cisalhamento e arranhamento com geração de calor e desgaste dessas superfícies. Estas são as principais funções que o fluido de corte terá que realizar durante a usinagem independente do material e ferramenta que será utilizada (BORNHOLD et al., 2011, p.2).

A não utilização de fluidos de corte retira da usinagem os seus benefícios, que são: a lubrificação, a refrigeração e a remoção dos cavacos gerados. Isto significa que há mais atrito e adesão entre a ferramenta e a peça, que são submetidas a uma maior carga térmica, o que pode resultar em níveis mais altos de desgaste da ferramenta (LÓPES et al., Apud ZEILMANN et al, [2009?], p.2).

Quanto a ocorrência de avarias foi percebido apenas uma pequena deformação plástica na ferramenta (Fotografia 22) com utilização de jorro de fluido abundante.



Fotografia 22 - Vista lateral da ferramenta de rosqueamento com detalhe da deformação plástica com uso de fluido abundante

Fonte: Autoria própria.

A deformação plástica ocorrida na ferramenta na usinagem com a utilização de fluido abundante pode estar relacionada ao seguinte fato: durante a usinagem, por causa do auto aquecimento gerado na peça durante o corte o material é amolecido, com a utilização de refrigerante este efeito de amolecimento é anulado requerendo assim maiores esforço para realizar o corte. Como a ferramenta utilizada é de aço rápido, a ocorrência de deformações na aresta torna-se mais propícia.

A deformação plástica segundo Espanhol (2008, p.11) é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa ocasionado pelo cisalhamento devido às altas tensões atuantes na superfície da ferramenta.

O fluido de corte quando considerado a função refrigerante causa um aumento da força de usinagem (ESPANHOL, 2008, p.21).

Novamente ressalta-se que este teste de desgaste teve como objetivo analisar o comportamento da ferramenta de torneamento e rosqueamento em vários meios de lubrificação/refrigeração. Ao se comparar esses meios no torneamento e no rosqueamento têm-se as seguintes observações:

- Para ambos os processos de usinagem a MQL trouxe a melhor condição para a vida da ferramenta, menor desgaste em fator da diminuição dos desgastes por abrasão e nenhuma avaria;

- Na usinagem com uso de fluido abundante no torneamento foi observado as piores condições de trabalho para ferramenta, maior desgaste e lascamentos, já no rosqueamento o uso de fluido abundante embora provocasse uma tendência a deformação plástica, resultou num nível intermediário de desgaste;

- A usinagem a seco mostrou-se a pior condição para a vida da ferramenta no rosqueamento, no entanto no torneamento resultou em menos desgaste que a utilização de jorro abundante. Não se observou nenhuma avaria na usinagem a seco, exceto o lascamento da ferramenta de torneamento que estava relacionado à imperfeição da ferramenta.

4.3 DESVIO DIMENSIONAL

4.3.1 Desvio dimensional no torneamento

Nos Gráficos 7,8 e 9 são apresentados os valores de desvios dimensionais para o processo de torneamento para os meios de lubrificação a seco, jorro abundante e MQL respectivamente.

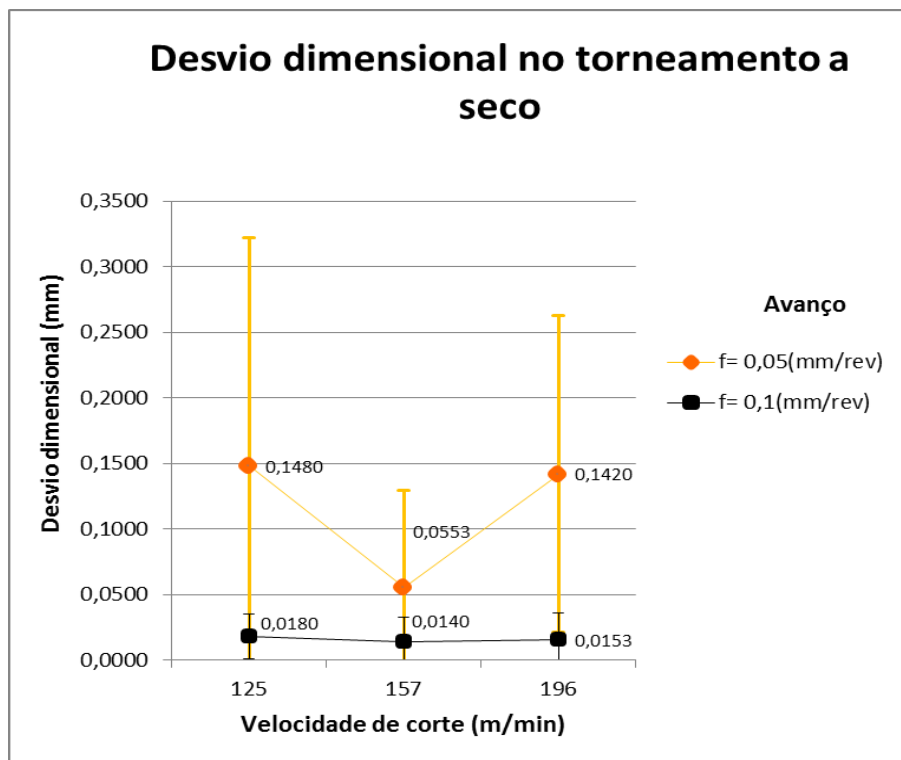


Gráfico 7- Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco
Fonte: Autoria própria.

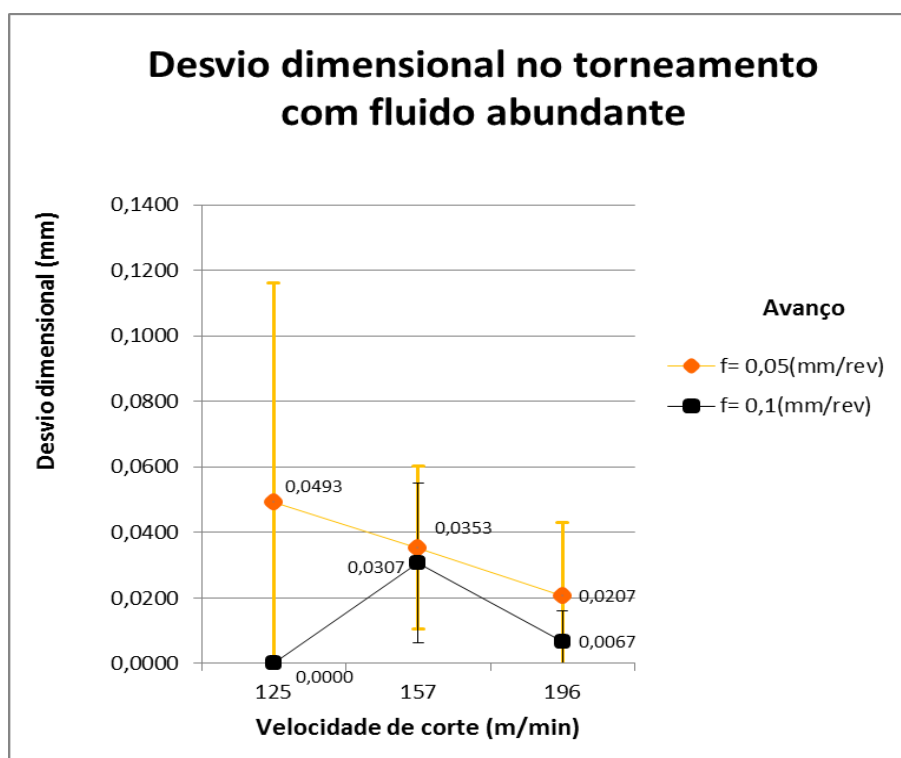


Gráfico 8 - Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando jorro de fluido abundante
Fonte: Autoria própria.

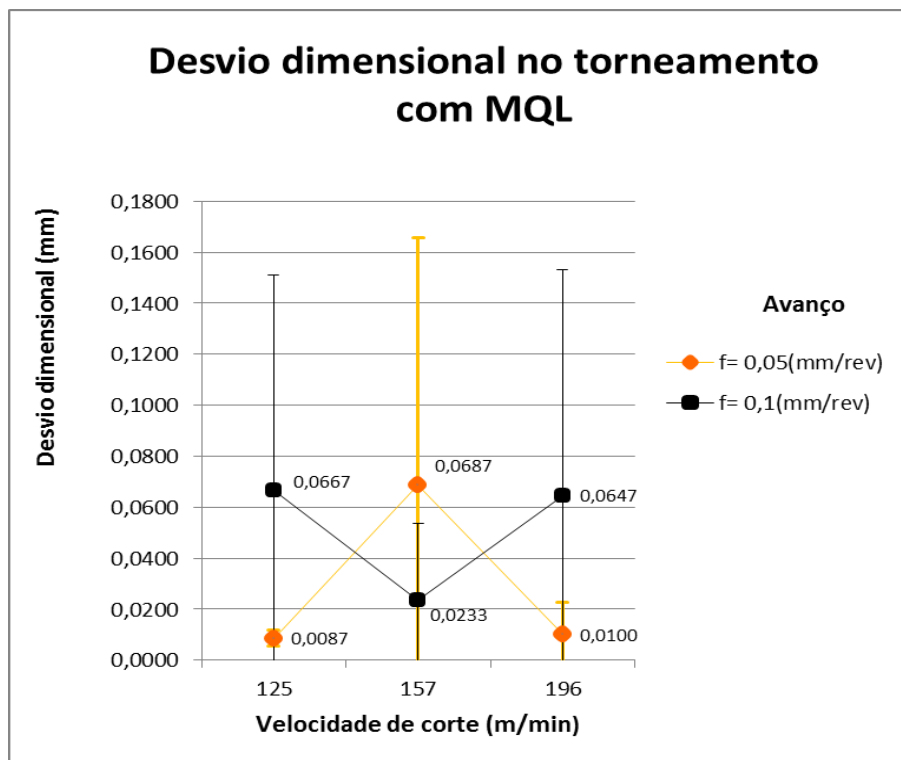


Gráfico 9 – Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios com MQL
Fonte: Autoria própria.

As medidas de desvio dimensional dos corpos de prova foram realizadas logo em seguida os seis passes da ferramenta no corpo de prova a fim de detectar possíveis dilatações na peça antes que ela esfriasse.

As análises dos Gráficos 7, 8 e 9 acima demonstram que o fator de maior influência exercida nos valores de desvio dimensional médio foi o avanço de corte (f). A influência causada pelo avanço de corte pode ser facilmente visualizada ao comparar os menores valores de desvio dimensional obtidos no avanço de 0,1 mm/rev. As únicas exceções em que o avanço de 0,1 mm/rev resultou em maiores valores foram na velocidade de 125m/min e 196m/min com lubrificação MQL. A explicação para o menor desvio dimensional obtido na maioria dos ensaios com o avanço maior pode ser o menor tempo em que a ferramenta ficou em contato, ou seja, atritando com a peça, não permitindo que o corpo de prova elevasse excessivamente sua temperatura.

Ao ser desbastado, a peça se aquece pelo atrito da ponta da ferramenta e o calor produz a dilatação da peça (ISVOR FIAT, [2004?], p.3).

A temperatura pode afetar a precisão da peça das seguintes formas: o calor dissipado através da ferramenta de corte altera sua temperatura e conseqüentemente, suas dimensões e posição relativa à peça; o calor dissipado ao ar através da peça provoca a sua deformação; o calor gerado pelo atrito entre as diversas partes da máquina-ferramenta aumenta a temperatura destas peças, mudando suas posições relativas (DÓRIA, 2005, p.15).

Uma análise mais precisa sobre os valores dos desvios dimensionais médios é necessária para verificar a influência da velocidade de corte, portanto percebe-se que essa variável não mantém uma tendência definida sobre o resultado do desvio dimensional, pois seu efeito mostra-se aleatório. No entanto algumas observações importantes merecem ser discutidas que foram: o menor desvio dimensional encontrado na velocidade de corte de 157 m/min na usinagem a seco em ambos os avanços e também no avanço de 0,1 mm/rev no corte com MQL e um caso particular que foi o desvio dimensional igual a 0 na velocidade de 125 m/min no avanço 0,1 mm/rev utilizando jorro de fluido abundante.

O Gráfico 10 compara os desvios dimensionais nos diferentes meios de lubrificação/refrigeração.

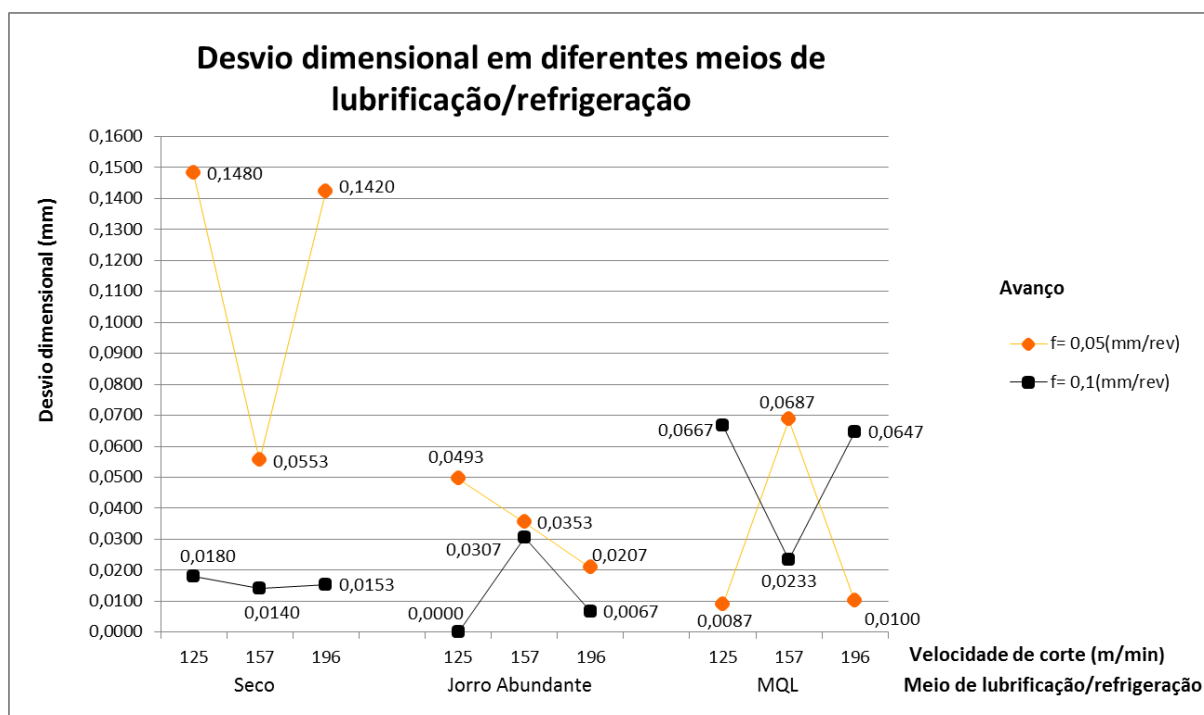


Gráfico 10 - Comparação do desvio dimensional obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração

Fonte: Autoria própria.

Observa-se no Gráfico 10 a maior influência do fluido de corte para o avanço de 0,05mm/rev, neste avanço a utilização de fluido de corte com jorro abundante reduziu o desvio dimensional e a MQL reduziu ainda mais para as velocidades de corte de 125 m/min e 196 m/min no avanço de 0,05 mm/rev. No avanço de 0,1 mm/rev a utilização de lubrificação/refrigeração por meio de jorro de fluido abundante trouxe menor desvio dimensional nas velocidades de 125 e 196, já a utilização do MQL neste avanço resultou em piores valores.

“Um dos inconvenientes da usinagem a seco diz respeito à tolerância dimensional da peça em função da dilatação sofrida pela mesma, face ao seu aquecimento” (OLIVEIRA et al., [2007], p.4). A utilização de meio lubrificante/refrigerante (jorro abundante) ou apenas lubrificante (MQL) pode ter reduzido o desvio dimensional no avanço de 0,05 mm/rev devido a redução do atrito por meio da lubrificação e assim a redução da temperatura durante a usinagem.

Dentre as principais funções do fluido de corte nas operações de usinagem, cita-se a redução da geração de calor pela diminuição do atrito e a retirada de calor da peça e da ferramenta (SCANDIFFIO, 2000; DINIZ & MICARONI, 2007 e MOMPER, 2000 apud BONANDI, 2012, P.22).

No avanço de 0,1 mm/rev por se tratar de um avanço mais rápido houve menor tempo de atrito entre a ferramenta e peça, portanto menor aumento de temperatura, motivo pelo qual houve menor dilatação térmica da peça e a lubrificação não tenha efeito plausível.

A diferença dimensional das peças torneadas pode também estar ligado a outros fatores que não seja o aumento excessivo de temperatura como relata Oliveira et al. ([2007], p.2) que diz que nos variados processos de fabricação de peças é impossível em função de uma série de variáveis (homem, máquina, ferramenta, sistema de medição, método, entre outros) a obtenção de dimensões exatamente iguais àquelas de projetos, presentes no desenho da peça.

Outra causa Segundo König (2002 apud TEDESCO, 2007, p.48) do surgimento de erros dimensionais possa ser devido a possibilidade de ocorrer deformações na máquina-ferramenta, ferramenta e peça.

4.3.2 Desvio dimensional no rosqueamento

Foi avaliado do processo de rosqueamento para análise dos desvios dimensional o diâmetro externo de uma rosca M30, detalhes na seção 3.1, pág.58. O Gráfico 11 mostra os resultados de desvios dimensionais médios e barras de erro representando o desvio padrão entre as repetições para cada meio de lubrificação/refrigeração utilizado.

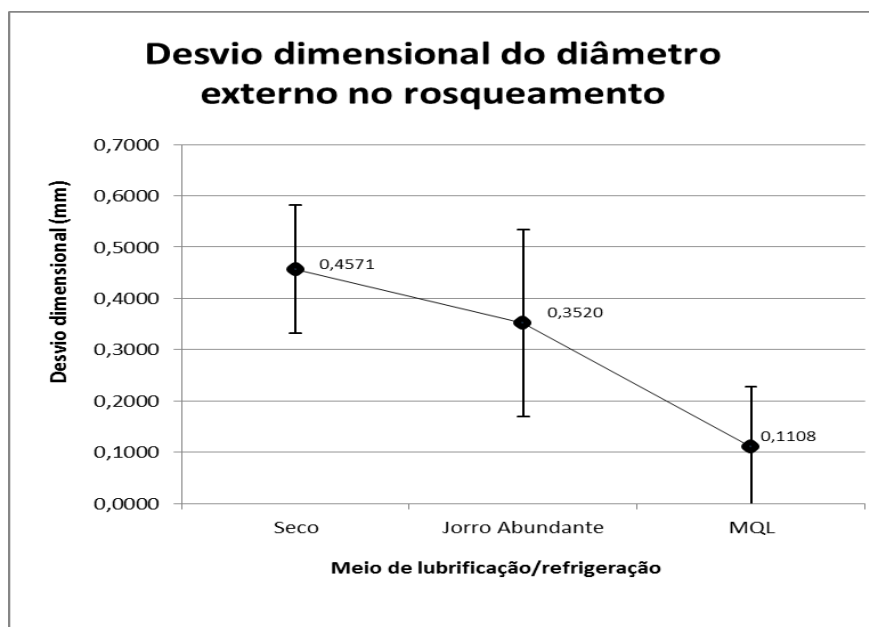


Gráfico 11 - Desvio dimensional e barra de desvio padrão para os ensaios de rosqueamento nos três meios de lubrificação/refrigeração
Fonte: Autoria própria.

Pela análise do Gráfico 11 é possível observar a grande redução do desvio dimensional com o uso de lubrificação/refrigeração. Esta grande influência da refrigeração é facilmente visível ao observar a declividade da linha que liga os valores para os diferentes meios de lubrificação/refrigeração. A usinagem a seco apresentou o maior desvio dimensional, 0,4571mm, a usinagem com uso de fluido com jorro abundante apresentou uma redução do desvio, porém o melhor resultado e redução drástica do desvio dimensional foi alcançado com a utilização da MQL, um valor de 0,1108mm.

Como já comentado em seção anterior para o desvio dimensional no processo de torneamento também observamos aqui a influência da lubrificação na redução do erro dimensional. O que leva a essa conclusão observando o processo de rosqueamento foi o fato de que a MQL resultou em menor erro dimensional do que a utilização do jorro abundante. A partir do conhecimento dos dois meios de lubrificação/refrigeração, sabe-se que para o jorro abundante foi utilizado uma emulsão, que seu poder refrigerante é maior que o lubrificante, detalhes na seção 3.6, pág. 64, já o MQL embora utilize o ar comprimido que possui característica refrigerante, o óleo utilizado, detalhes na seção 3.7, pág.64, possui efeito meramente lubrificante.

O Gráfico 12 apresenta uma comparação dos valores de desvios dimensionais obtidos nos processos de rosqueamento e torneamento.

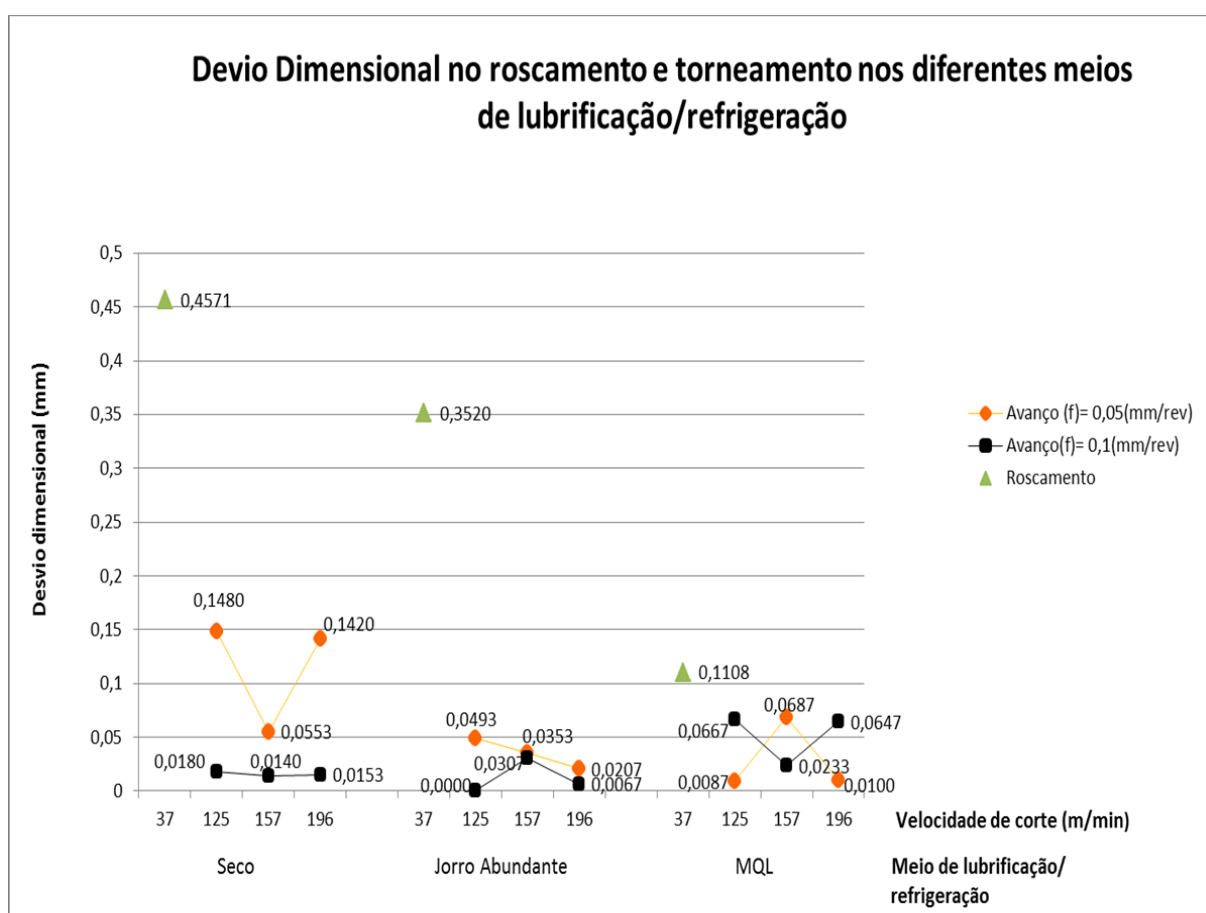


Gráfico 12 - Comparação do desvio dimensional no rosqueamento e torneamento
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os desvios dimensionais do processo de rosqueamento são maiores do que no torneamento, isso se deve as características de cada processo.

Confrontando os resultados obtidos nos dois processos, observa-se que no rosqueamento o uso de meio lubrificante/refrigerante trouxe melhor desempenho, principalmente a MQL, do que no torneamento.

O fato para a melhor interação do MQL no processo de rosqueamento talvez esteja relacionado a lubrificação da interfase ferramenta-peça-cavaco, reduzindo assim o atrito nessa interfase e conseqüentemente a dilatação por efeito térmico e possíveis deformações, visto que as características da ferramenta e do processo como velocidade de corte baixa, geometria da peça resultante do processo permitem melhor desempenho desta técnica.

Segundo Fernandes (2010, p.1) uma das principais funções dos fluidos de corte é a lubrificação a baixas velocidades, que ocorre devido a formação de uma película de fluido entre a peça e a ferramenta, evitando assim o contato direto entre ambos.

4.4 DESVIO DE CIRCULARIDADE

São apresentados nos Gráficos 13, 14 e 15 os valores médios dos desvios de circularidade de cada meio de lubrificação/refrigeração expressos em mm (milímetros), cada Gráfico apresenta as condições de velocidade de corte e avanço para cada meio lubrificante/refrigerante.

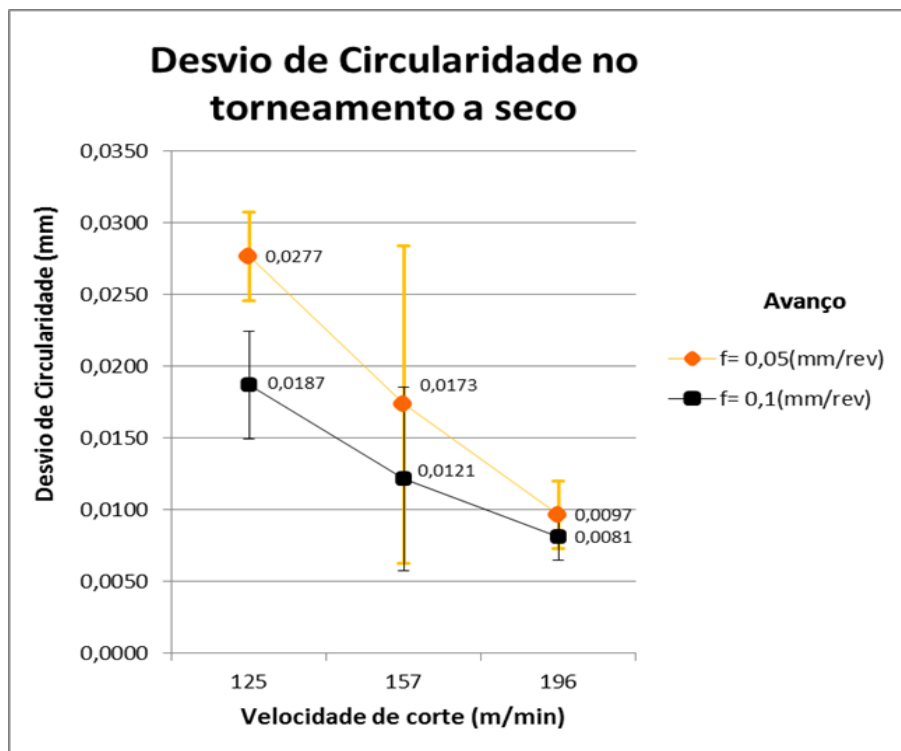


Gráfico 13 – Desvio médio de circularidade e barra de desvio padrão para os ensaios de torneamento realizados a seco

Fonte: Autoria própria.

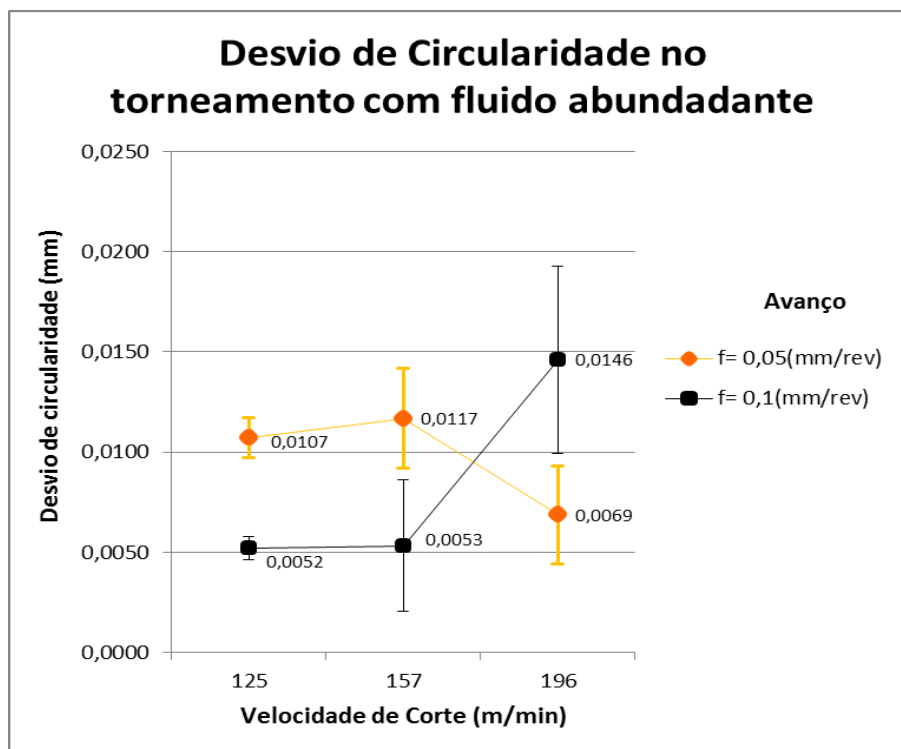


Gráfico 14 - Circularidade média e barra de desvio padrão para os ensaios de torneamento realizados com fluido abundante

Fonte: Autoria própria.

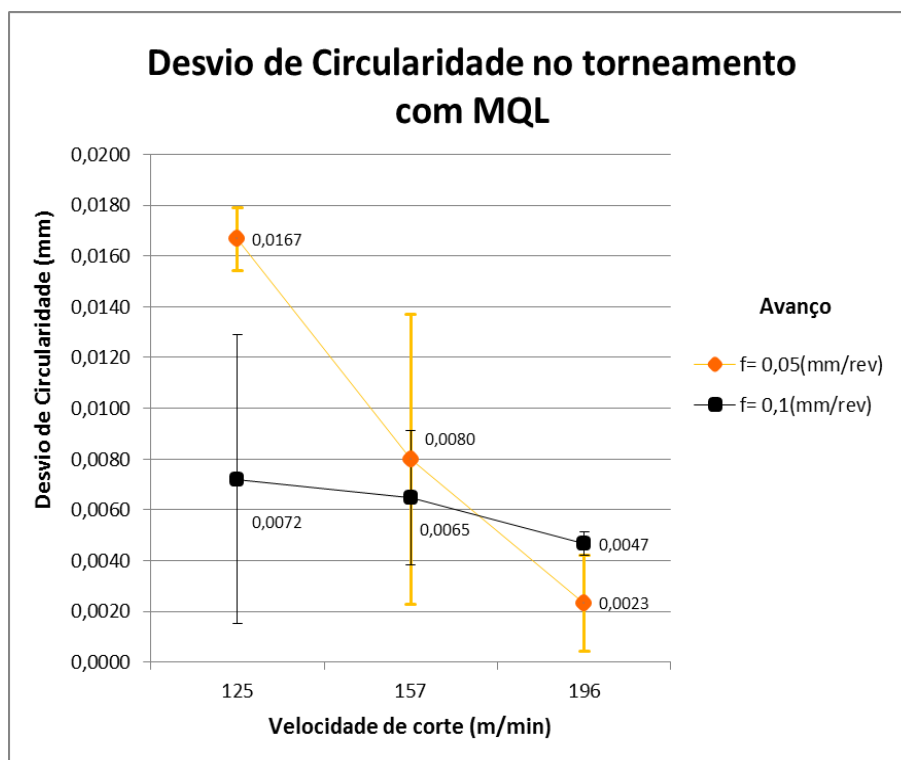


Gráfico 15 - Circularidade média e barra de desvio padrão para os ensaios realizados com MQL

Fonte: Autoria própria.

Os valores dos resultados apresentados nos Gráficos representam uma média das três repetições de cada combinação e a barra de erro representa o desvio padrão entre as réplicas. Os demais Gráficos seguem a mesma metodologia.

É possível visualizar facilmente nos Gráficos 13 e 15 (usinagem a seco e usinagem com MQL) a influência causada pela velocidade de corte. Ao comparar os valores de circularidade medidos nos ensaios com velocidades de 125 m/min, 157m/min e 196 m/min nos avanços de 0,05 mm/rev e 0,1 mm/rev observa-se nesses casos uma tendência da diminuição do desvio de circularidade ao aumentar a velocidade de corte. No avanço de 0,05 mm/rev essa influência é mais forte como pode ser observado com a inclinação da linha que liga os resultados entre as velocidades de corte.

De acordo com Ghani & Choudhury (2002; apud BONANDI 2012, p.63) em materiais com menor dureza, o processo tende a ficar mais e mais estável com o aumento da velocidade de corte e conseqüente redução da vibração do conjunto máquina-suporte-peça.

Em relação à variação do avanço, este também representa uma variação da circularidade, porém em proporções menores. Observam-se para os três tipos de lubrificação/refrigeração menor desvio de circularidade no avanço de 0,1 mm/rev, exceto para velocidade de corte de 196m/min na usinagem com fluido abundante e com MQL que o avanço de 0,05mm/rev apresentou melhores resultados.

O uso de fluido de corte, como pode ser observado no Gráfico 14 apresentou um comportamento bem diferente da usinagem a seco e com MQL, embora apresente resultados de circularidade inferiores a usinagem a seco, houve um caso não esperado que foi um aumento da circularidade quando se aumentou a velocidade de corte de 157 m/min para 196m/min no avanço de 0,1 mm/rev. Esse último resultado, o aumento não esperado da circularidade, pode ter sido influenciado, pelo fato dos testes serem realizados em um torno mecânico convencional, pela rigidez do conjunto máquina, ferramenta, dispositivo de fixação e peça. Segundo Dória, (2005, p.15) esses componentes tem grande influência na formação de erros das peças torneadas.

Outro detalhe observável nos Gráficos 13 e 15, pág. 104 e 105, foi a grande extensão da barra de erro (desvio padrão) nas seguintes condições: velocidade de corte de 157m/min , avanço de 0,05 mm/rev com usinagem a seco e MQL e velocidade de corte de 125m/min, avanço de 0,1 mm/ver com usinagem MQL. Essas diferenças de resultado entre as repetições, os erros experimentais, são consequência de fatores não controláveis como, por exemplo, imprecisão da máquina, erros em operações de utilização e desgaste da máquina. (FERREIRA, [s. d.] p.27).

No Gráfico 16 é apresentada a comparação dos valores da circularidade nos três métodos de lubrificação/refrigeração.

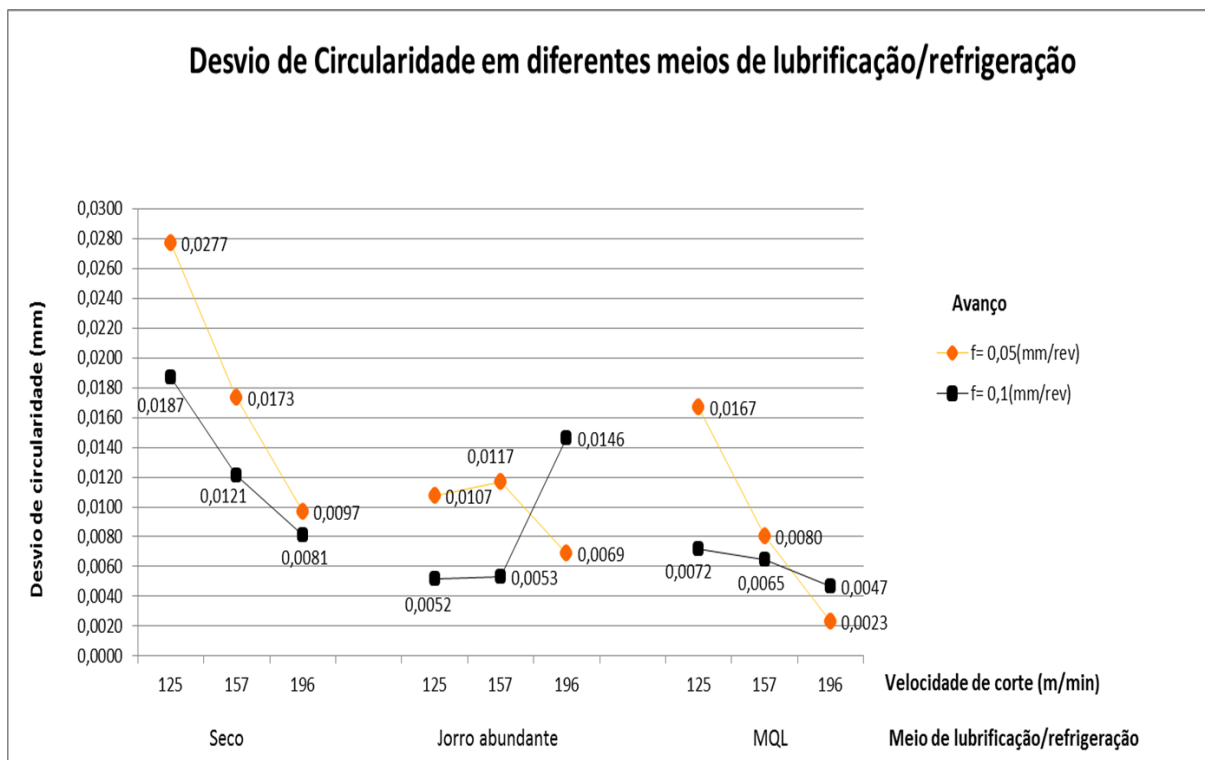


Gráfico 16 - Comparação dos desvios de circularidade obtidos nos três métodos de lubrificação/refrigeração

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 16 nos mostra que os melhores valores de circularidade de forma geral foram obtidos nas maiores velocidade de corte. Em relação ao avanço houve melhores resultados no avanço de 0,1 mm/rev e quanto ao método de lubrificação/refrigeração a usinagem a seco apresentou os piores resultados. É possível ao analisar o Gráfico acima inferir que o uso de meio lubrificante/refrigerante (jorro abundante) ou apenas lubrificante (MQL) diminui o desvio de circularidade.

De acordo com Ferreira ([s. d.], p.30) durante a usinagem, os elementos do sistema Máquina/Ferramenta/Dispositivos de Fixação/Peça (MFDP) são aquecidos. Isto leva à deformação térmica do sistema e a erros de usinagem. Esse calor origina-se de várias fontes, tais como o processo de corte, o atrito entre os componentes da máquina-ferramenta, e a unidade de potência.

Sabe-se que o calor será distribuído entre a peça, ferramenta e os cavacos e depende das condições de usinagem. Com a utilização de meios lubrificantes há uma redução do calor gerado pela lubrificação e refrigeração reduzindo o erro de

circularidade. A aplicação de certas medidas como a utilização de fluido de corte diminui os efeitos da deformação térmica do sistema MFDP (DÓRIA, 2005, p.15).

Para o Projeto Programa Piloto Para a Minimização dos Impactos Gerados por Resíduos Perigosos (2006, p.32) quando se exige melhor desempenho referente aos desvios de circularidade deve-se utilizar a técnica MQL, pois a geração de calor promove o amolecimento do material e com isso melhora o processo de usinagem e o fluido pode impedir este amolecimento.

4.5 DESVIO DE PARALELISMO

Nos Gráficos 17, 18 e 19 são apresentados os gráficos dos valores médios dos desvios de paralelismo para cada condição de usinagem empregada, na usinagem a seco, com jorro abundante e MQL:

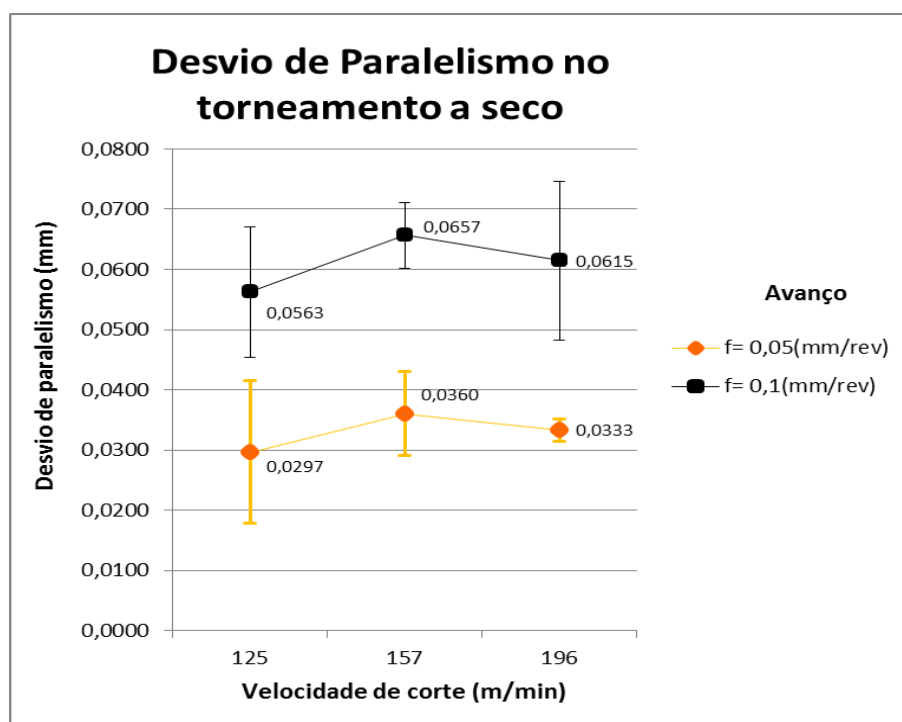


Gráfico 17- Paralelismo médio e barra de desvio padrão para cada um dos ensaios usando a seco

Fonte: Autoria própria.

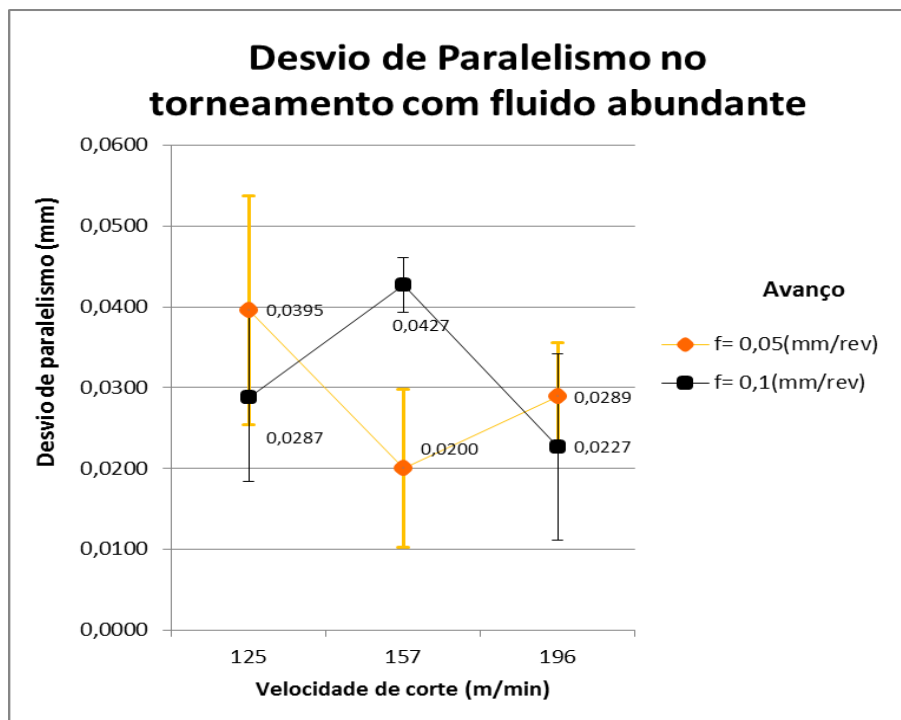


Gráfico 18 - Paralelismo médio e barra de desvio padrão para cada um dos ensaios usando com fluido abundante

Fonte: Autoria própria.

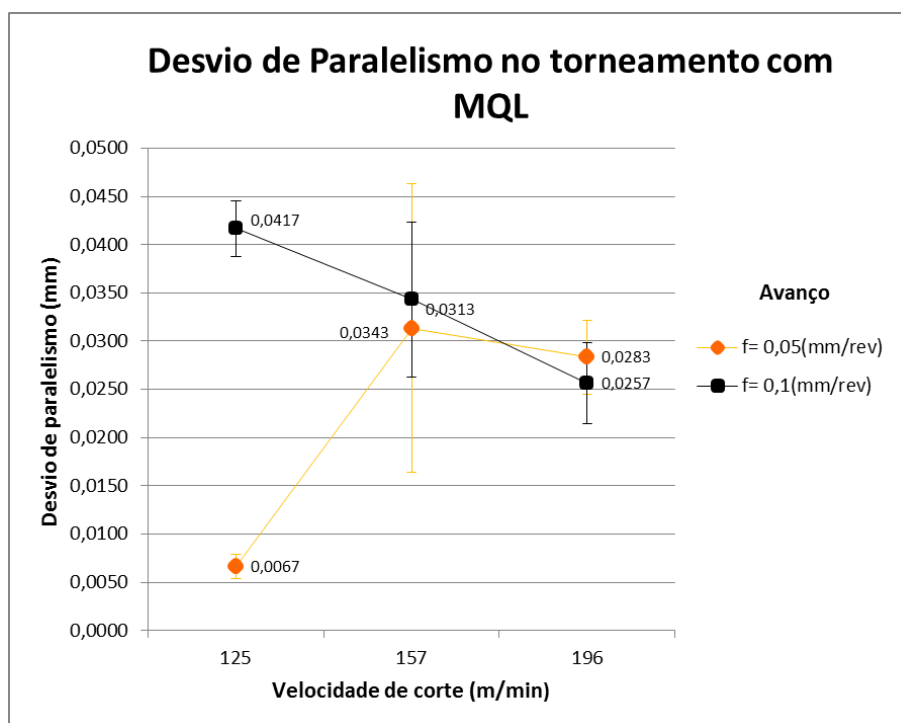


Gráfico 19 - Paralelismo médio e barra de desvio padrão para cada um dos ensaios usando com MQL

Fonte: Autoria própria.

Na usinagem a seco observa-se um maior desvio de paralelismo no avanço de 0,1 mm/rev.

Na usinagem com jorro abundante não se tem um comportamento seguro quanto a velocidade de corte, no avanço de 0,05 mm/rev a velocidade de 157m/min apresenta o menor desvio de paralelismo, já no avanço de 0,1 mm/rev as velocidades de 125m/min e 196m/min apresentam menor desvio de paralelismo.

Na usinagem com MQL observa-se no avanço de 0,1 mm/rev, que apresentou maiores valores de desvio de paralelismo nas velocidades de 125m/min e 157m/min, uma queda de seu valor ao aumentar a velocidade. E também neste Gráfico nota-se no avanço de 0,05 mm/rev na velocidade de 125 m/min um valor baixíssimo de desvio, menor valor obtido em comparação com todos os parâmetros empregados.

No Gráfico 20 é apresentada a comparação entre os valores de desvio de paralelismo nos três métodos de lubrificação/refrigeração.

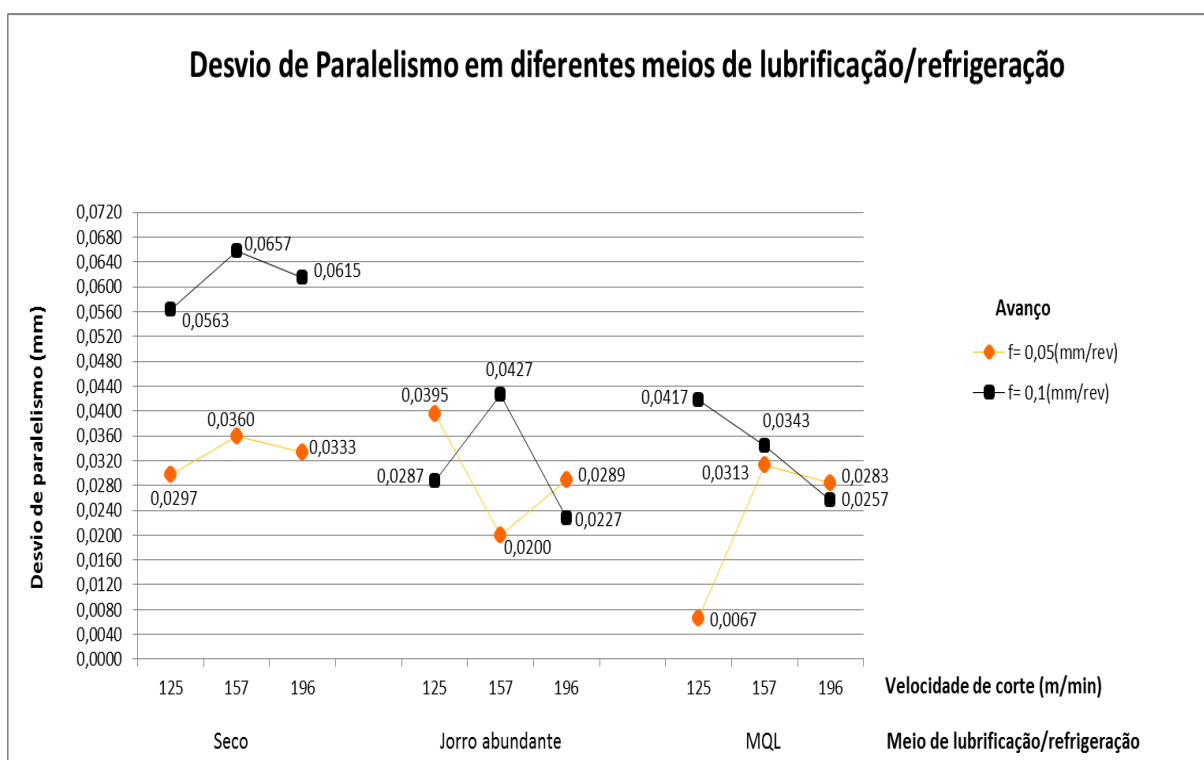


Gráfico 20 - Comparação do paralelismo obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração
 Fonte: Autoria própria.

Por meio do Gráfico 20 percebe-se que os piores valores de desvio de paralelismo foram obtidos na usinagem a seco, percebe-se então que o uso de fluido de corte abundante ou o MQL diminuiu o desvio de paralelismo do corpo de prova ensaiado.

Durante a operação de usinagem, a temperatura do sistema MFDP sofre grandes alterações, provocando deformações térmicas nos elementos do sistema e deslocamentos relativos de um componente em relação a outro. A consequência disso é o aparecimento de desvios da posição teórica entre as superfícies usinadas, além da variação das formas respectivas comparadas às formas teóricas (DÓRIA, 2005, p.14). Ainda de acordo com Dória (2005, p.15) a utilização de fluido estabiliza a temperatura do sistema e diminui esses efeitos negativos do calor gerado.

Outro fator que pode influenciar sobre a forma da peça usinada segundo Porto (2004, apud TEDESCO, 2007, p.51) são as forças de corte que causam problemas de dilatação térmica na peça. “A deformação no sistema de usinagem sob as forças de corte, fixação, gravitacionais e inerciais altera a posição relativa entre a ferramenta e a peça que foi presetada corretamente, portanto causa erros de usinagem” (FERREIRA, [s. d.], p.28).

A análise da velocidade de corte e avanço nos mostra que a velocidade de corte de 157m/min e avanço de 0,1 mm/rev formam na maior parte dos ensaios os parâmetros que apresentaram os maiores valores de desvio de paralelismo.

4.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Para análise do acabamento superficial foram examinados três parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz, os três disponíveis no rugosímetro utilizado.

4.6.1 Rugosidade Ra

Os resultados de rugosidade Ra para a usinagem a seco, com fluido abundante e MQL são apresentados respectivamente nos Gráficos 21, 22 e 23.

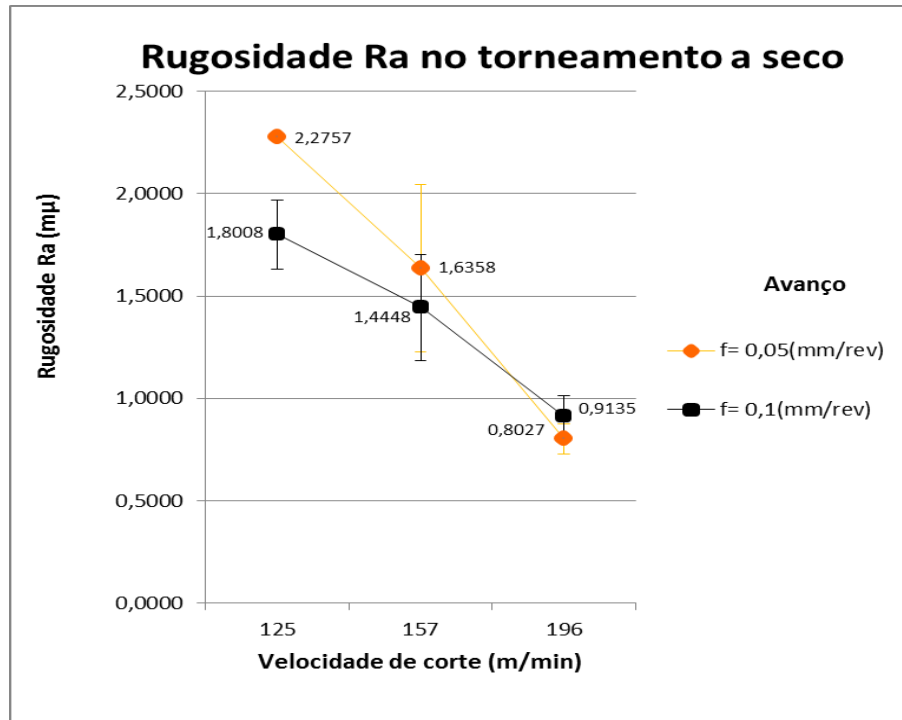


Gráfico 21 - Rugosidade Ra e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco

Fonte: Autoria própria.

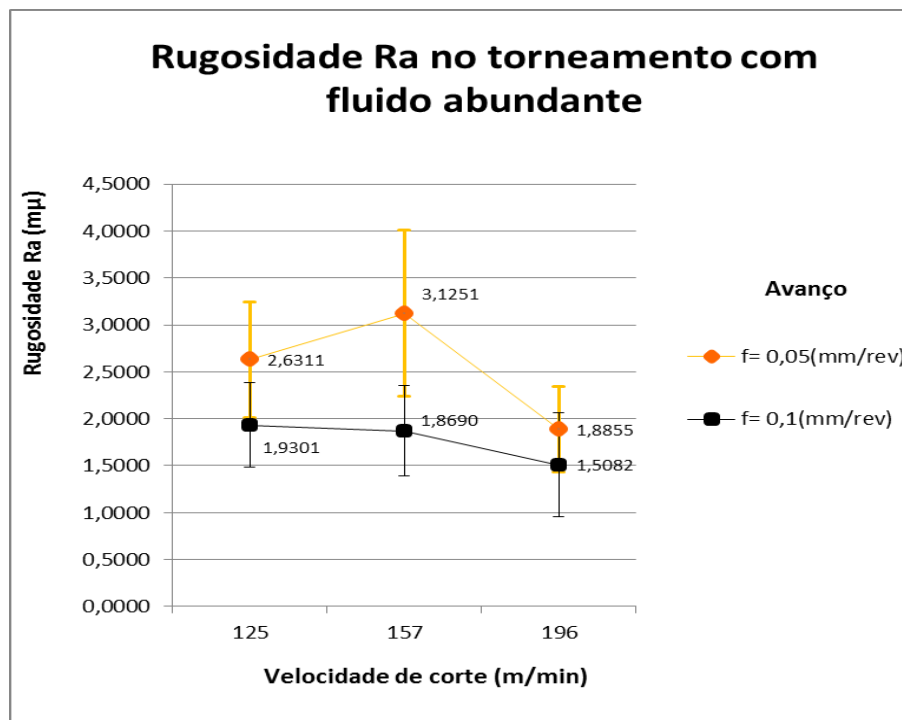


Gráfico 22 - Rugosidade Ra e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando fluido abundante

Fonte: Autoria própria.

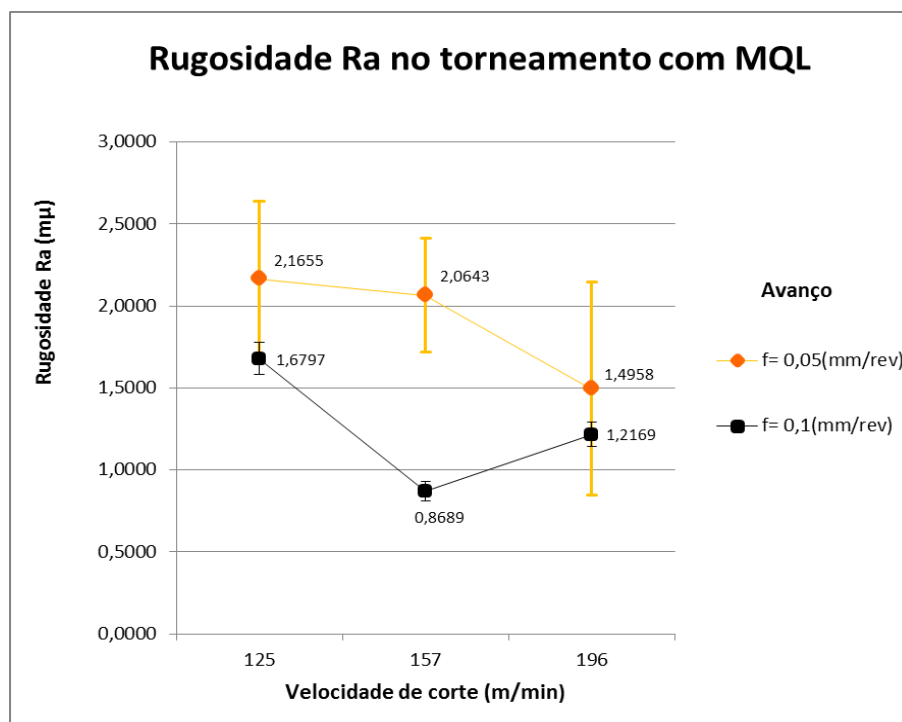


Gráfico 23 - Rugosidade Ra e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando MQL

Fonte: Autoria própria.

A análise dos Gráficos 21, 22 e 23 mostra uma tendência da diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte.

“Normalmente o acabamento superficial melhora com o aumento da velocidade de corte” (STEMMER, 1995, p.186).

A explicação para a redução da rugosidade superficial com o acréscimo da velocidade está no processo de formação do cavaco. Em maiores velocidades o cisalhamento completo do cavaco pode ocorrer ainda na zona primária de cisalhamento, pois o aumento da velocidade provoca uma elevação da temperatura na região de corte e causa um amolecimento do material. No entanto ao mesmo tempo o material à frente da aresta de corte apresenta uma elevação na sua resistência mecânica, devido ao encruamento causado por uma maior deformação plástica. Assim o material se torna frágil devido ao encruamento e dúctil em virtude do amolecimento facilitando a formação do cavaco. Dessa maneira, pode-se dizer que o cavaco torna-se mais cisalhado do que recalcado e o corte ocorre com maior facilidade, melhorando o acabamento superficial (PAULO et al., 2007, p.7).

Na usinagem a seco essa influência é mais visível apresentando uma faixa de variação mais ampla de valores de rugosidade e uma declividade bem definida quando se variou a velocidade de corte da menor para maior. Na usinagem com uso de fluido essa diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade não foi tão pronunciada quanto na usinagem a seco, para o avanço de 0,1 mm/rev ocorreu uma pequena redução entre as mudanças de velocidade de corte, já no avanço de 0,05 mm/rev houve um comportamento diferente que foi o aumento da rugosidade quando aumentou a velocidade de corte de 125 m/min para 157 m/min e depois uma redução brusca quando alterou a velocidade para 196 m/min. Um outro comportamento diferente da rugosidade é percebido no corte utilizando MQL, nesta técnica há redução considerável da rugosidade entre os aumentos da velocidade no avanço de 0,05 mm/rev e no avanço de 0,1 mm/rev ocorreu uma forte redução da rugosidade entre as velocidades de 125 m/min e 157 m/min e depois um aumento da rugosidade com a alteração da velocidade de 157 m/min para 196 m/min.

Observa-se também nestes Gráficos uma forte relação da rugosidade com o avanço, para todos os parâmetros de lubrificação/refrigeração o avanço de 0,1 mm/rev, o maior, apresentou menor rugosidade.

O Gráfico 24 apresenta a comparação entre os valores de rugosidade R_a obtidos nos três métodos de lubrificação/refrigeração.

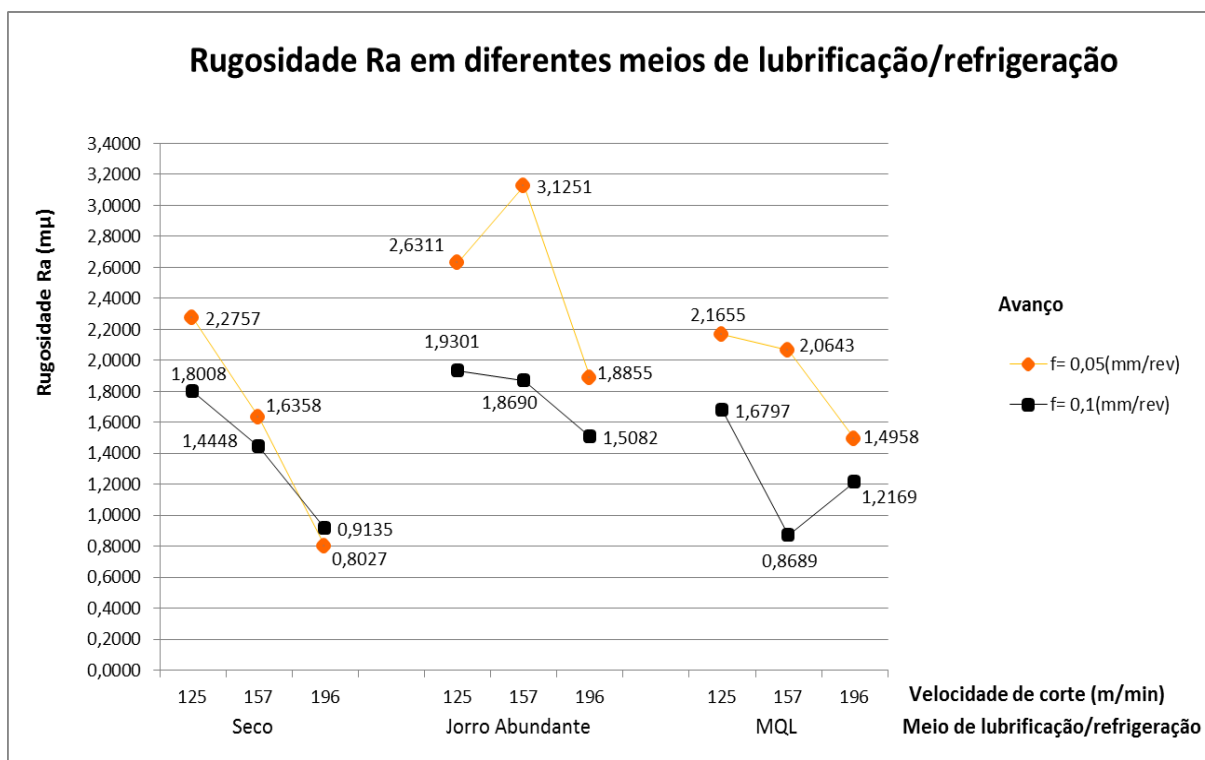


Gráfico 24 - Comparação da rugosidade Ra obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração

Fonte: Autoria própria.

A comparação da rugosidade Ra obtida nos diferentes meios de lubrificação/refrigeração permite visualizar que a usinagem com fluido abundante resultou em maiores valores de rugosidade Ra em todas as combinações de velocidade de corte e avanço em relação a esses mesmos parâmetros na usinagem a seco e com MQL.

A utilização de fluido de corte, portanto piorou a qualidade superficial da peça usinada.

Um experimento de torneamento de aço com pastilhas de metal duro recobertas foi realizado por Micarone e Diniz (2002) eles usinaram com e sem fluido de corte e concluíram que, a retirada do fluido de corte do processo diminui o consumo de potência e a rugosidade da peça. Segundo eles (p.6) o corte a seco realmente facilita a formação do cavaco ao diminuir a dureza e resistência do material próximo à região de cisalhamento do cavaco.

Em alguns casos, o aumento da rugosidade também pode ser atribuído ao emaranhamento do cavaco na operação de acabamento, que permanece em

contato, riscando a peça e assim prejudicando o acabamento (TEDESCO, 2007, p.53)

Quanto a lubrificação com MQL embora em algumas combinações (avanço de 0,05 mm/rev com velocidades de 157 m/min e 196 m/min e no avanço de 0,1 mm/rev com velocidade de 196 m/min) tenha piorado o acabamento superficial, em outros parâmetros melhorou, que foi no avanço de 0,05mm/rev com velocidade de 125 m/min e no avanço de 0,1 mm/rev com velocidades de 125 m/min e 157 m/min. A observação feita nesses resultados é que a utilização da MQL melhorou o acabamento nas velocidades de corte mais baixa e piorou nas velocidades de corte maiores. Além disso, a MQL apresentou menor variação do valor de rugosidade Ra quando se altera a velocidade de corte.

O bom resultado encontrado na condição de MQL é resultado da melhor formação do cavaco assim como na usinagem a seco.

Na condição MQL embora ocorra a carência de refrigeração na zona de corte, o calor gerado também tem um efeito positivo, pois a elevação da temperatura do metal a ser usinado diminui sua resistência ao cisalhamento. A mínima lubrificação é suficiente para reduzir o atrito, ao mesmo tempo em que é aproveitado o efeito positivo do calor na região de corte. Este efeito não ocorre na condição de emulsão, pois a utilização do fluido em abundância impede uma elevação significativa da temperatura da peça, mantendo a elevada resistência ao cisalhamento do material (ZEILMANN et al., [2009?], p.6).

4.6.2 Rugosidade Rq

São apresentados nos Gráficos 25, 26 e 27 os valores de rugosidade Rq.

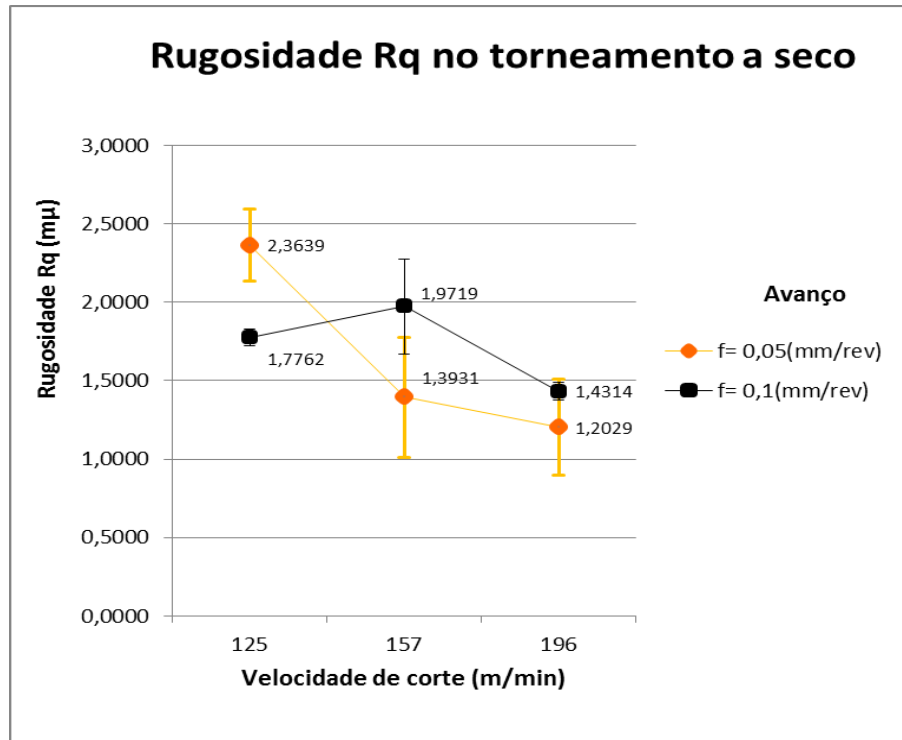


Gráfico 25 - Rugosidade Rq e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco

Fonte: Autoria própria.

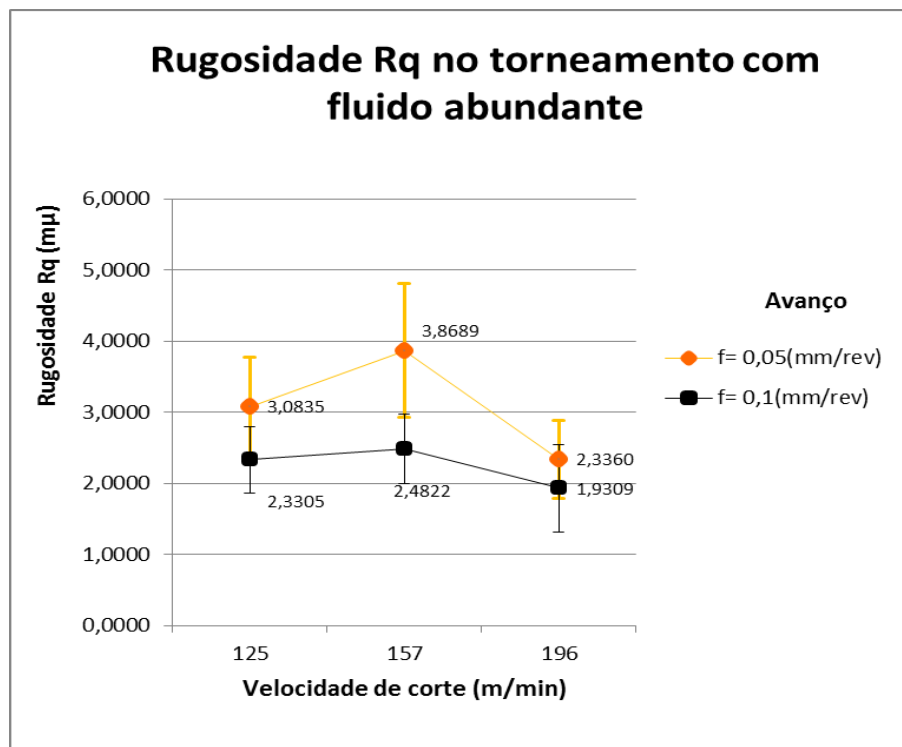


Gráfico 26 - Rugosidade Rq e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando fluido abundante

Fonte: Autoria própria.

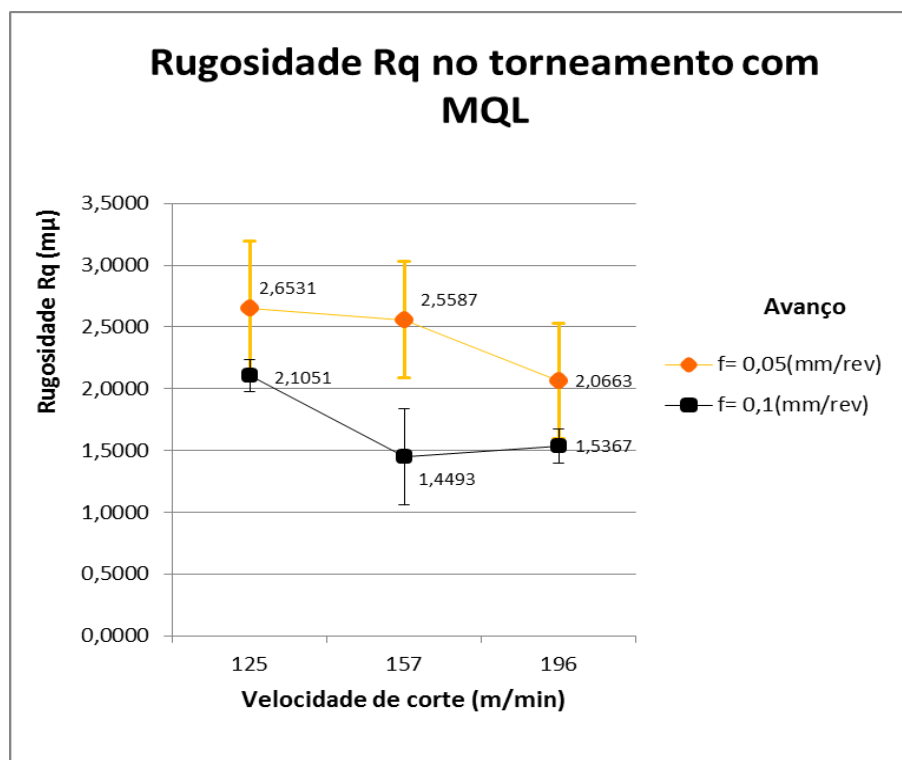


Gráfico 27 - Rugosidade Rq e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem utilizando MQL

Fonte: Autoria própria.

Analogamente à rugosidade Ra a rugosidade Rq apresentou uma forte dependência com relação a velocidade de corte e avanço. Portanto com comportamentos um pouco diferentes quando se alterou os parâmetros de usinagem. Na usinagem a seco, como pode ser observado no Gráfico 25, pág. 116, um comportamento diferente do Rq em relação ao Ra, foi um aumento da rugosidade Rq ao utilizar a velocidade de corte de 157 m/min no avanço de 0,1 mm/rev e também valores de Rq neste mesmo avanço maiores que no avanço de 0,05 mm/rev. A declividade dos valores de rugosidade Rq com relação a mudança da velocidade também foram menores quando comparados ao Ra.

Na usinagem com uso de fluido de corte e com MQL como pode ser notado nos Gráficos 26 e 27 observa-se um comportamento do Rq semelhante ao Ra inclusive menores valores de rugosidade no avanço de 0,1 mm/rev. Apesar dessa semelhança uma diferença é notada no pequeno aumento da rugosidade no avanço de 0,1 mm/rev na velocidade de 157 m/min com uso de fluido de corte abundante.

Uma característica diferente notada nos Gráficos das rugosidades em relação aos Gráficos da circularidade, paralelismo e desvio dimensional foi a menor

dispersão dos resultados entre as diferentes repetições, resultando em menores desvios padrões. Uma justificativa para isso pode ser o instrumento de medição utilizado, já que a medição da rugosidade foi feita com um rugosímetro, um aparelho eletrônico, enquanto a circularidade, paralelismo e desvio dimensional foram medidos com o relógio comparador e micrômetro, medição manual.

Os efeitos dos erros de medição são os mesmos comparados com os erros de usinagem. As razões principais destes erros são: imprecisão dos instrumentos, medições executadas de forma inadequada, influência da temperatura ambiente (FERREIRA, [s. d.], p.33).

A comparação dos valores de rugosidade R_q nos três métodos de lubrificação/refrigeração está no Gráfico 28:

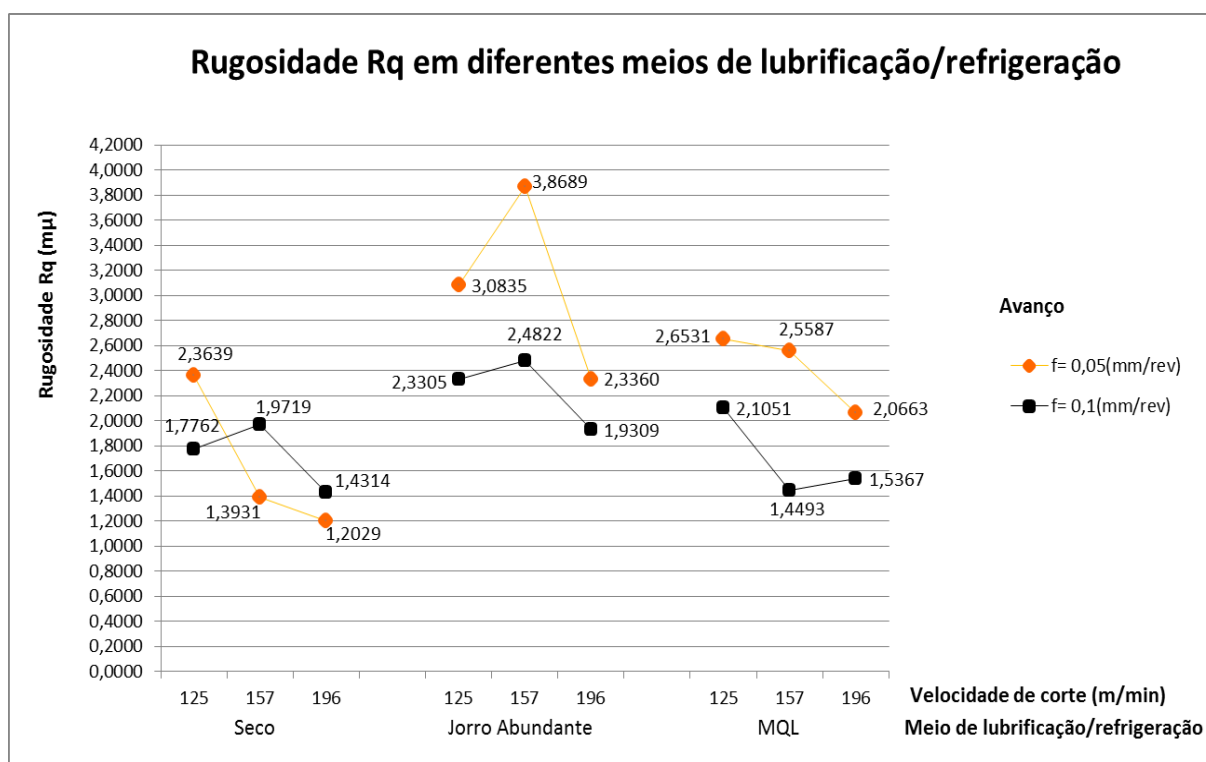


Gráfico 28 - Comparação da rugosidade R_q obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração

Fonte: Autoria própria.

Como esperado, relembrando a análise já feita da rugosidade R_a , a usinagem com uso de fluido de corte abundante trouxe os maiores valores de rugosidade R_q . Já a técnica da MQL mostrou-se menos satisfatória em relação a

usinagem a seco por apresentar embora não muito elevados, mas na maior parte dos parâmetros valores maiores de rugosidade R_q .

Vale ressaltar que ainda que tenha sido feita essa analogia do comportamento da rugosidade R_q com a rugosidade R_a em relação a mudança dos parâmetros de corte, os valores desses dois parâmetros de medida de rugosidade são diferentes por se tratar de parâmetros diferentes de rugosidade dado pelo aparelho rugosímetro.

4.6.3 Rugosidade R_z

Nos Gráficos 29, 30 e 31 são apresentados os resultados da rugosidade R_z para os meios de lubrificação/refrigeração.

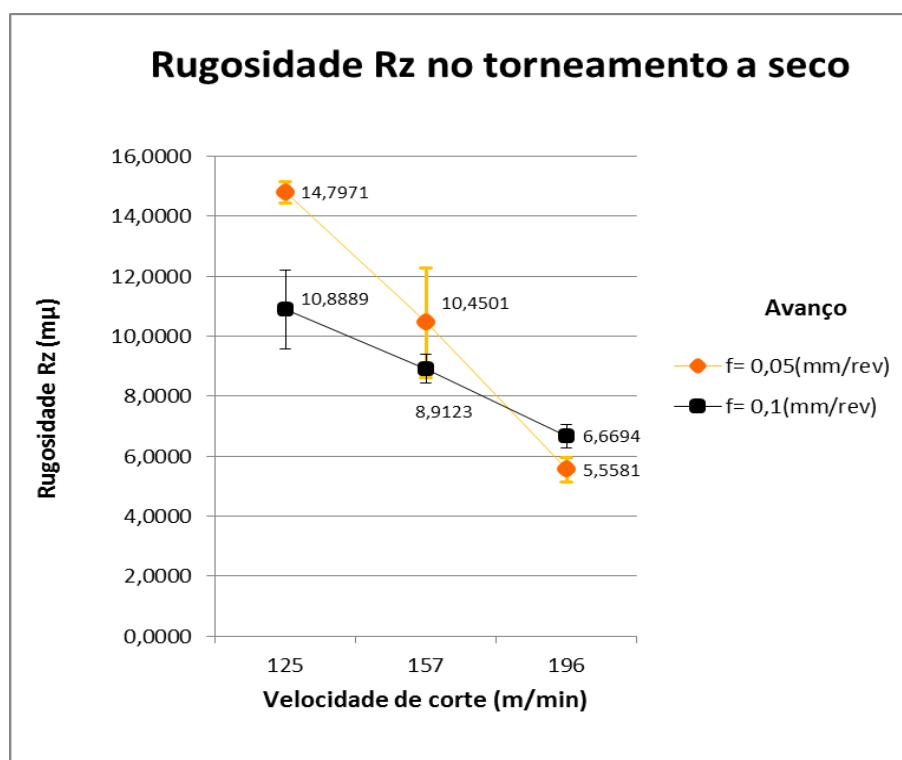


Gráfico 29 - Rugosidade R_z e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem a seco

Fonte: Autoria própria.

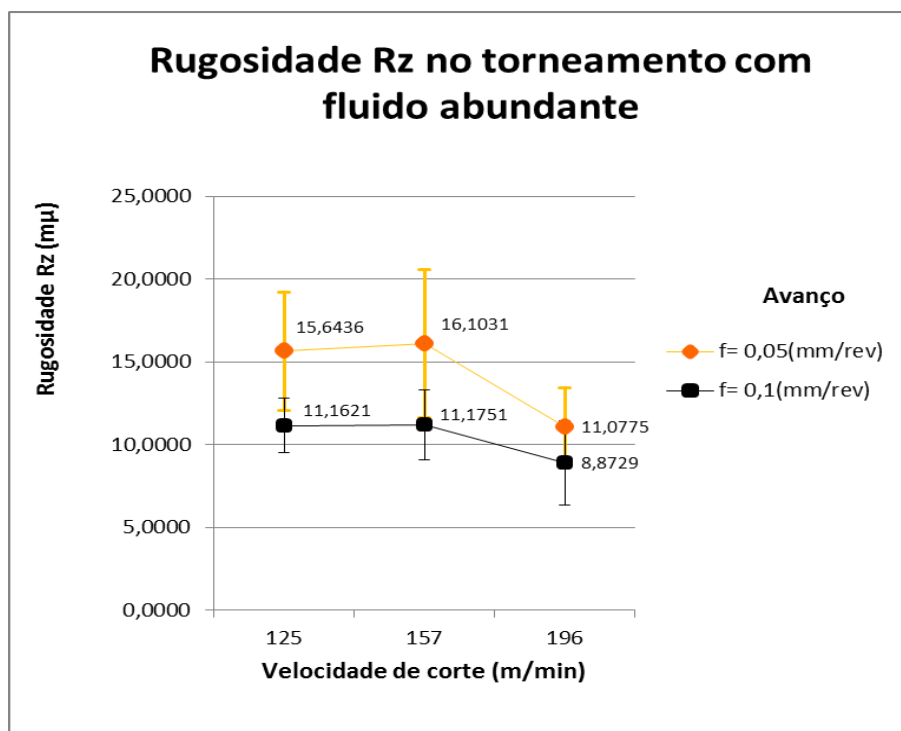


Gráfico 30 - Rugosidade Rz e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem com fluido abundante
 Fonte: Autoria própria.

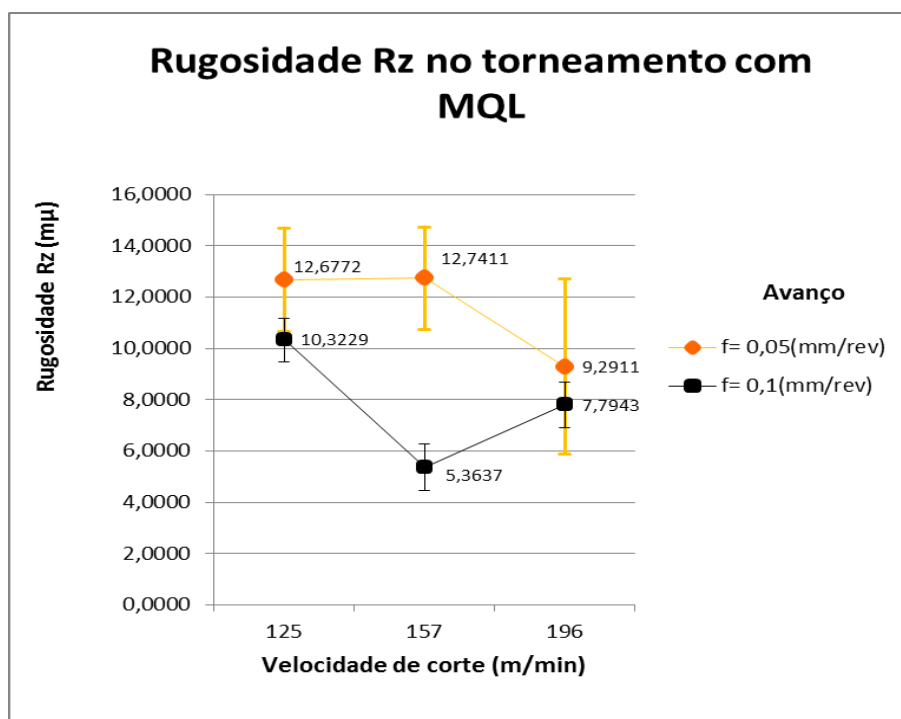


Gráfico 31 - Rugosidade Rz e barra de desvio padrão para os ensaios com usinagem com MQL
 Fonte: Autoria própria.

Ao analisar os Gráficos 29, 30 e 31 é possível observar a interação da velocidade de corte, do avanço e do meio de lubrificação/refrigeração com a rugosidade Rz como já visto nas rugosidades Ra e Rq.

Para a usinagem a seco, Gráfico 29, tem-se uma redução bem definida da rugosidade Rz com o aumento da velocidade de corte, sendo que essa redução é mais pronunciada no avanço de 0,05 mm/rev como pode ser observado pela inclinação da linha que liga os valores do resultado do mesmo avanço. Outra característica importante dessa inclinação das linhas é sua linearidade, o que comprova o efeito da velocidade de corte no resultado da rugosidade Rz.

Na usinagem com uso de fluido de corte abundante observa-se uma estabilidade do valor da rugosidade Rz nas velocidades de corte de 125 m/min para 157 m/min e depois uma diminuição quando empregada a velocidade de 196 m/min isso nos dois avanços ensaiados.

Já com a lubrificação via MQL o comportamento dos valores de rugosidade Rz frente a alteração de velocidade de corte e avanço foi diferente da usinagem a seco e com fluido de corte abundante. Nota-se que no avanço de 0,05 mm/rev não houve alteração significativa do valor da rugosidade Rz na mudança de velocidade de 125 m/min para 157 m/min e houve uma diminuição do Rz da velocidade de 157 para 196 m/min. No avanço de 0,1 mm/rev houve uma melhora da qualidade superficial em relação ao Rz na primeira mudança de velocidade e depois uma piora quando utilizou a terceira velocidade de corte.

Outro fator de grande influência na rugosidade, já comentado para o Ra, foi o avanço, no caso da rugosidade Rz o avanço de 0,1 mm/rev também foi o que apresentou melhor acabamento superficial.

No Gráfico 32 a seguir são mostrados os resultados de Rz para todos os métodos de lubrificação/refrigeração.

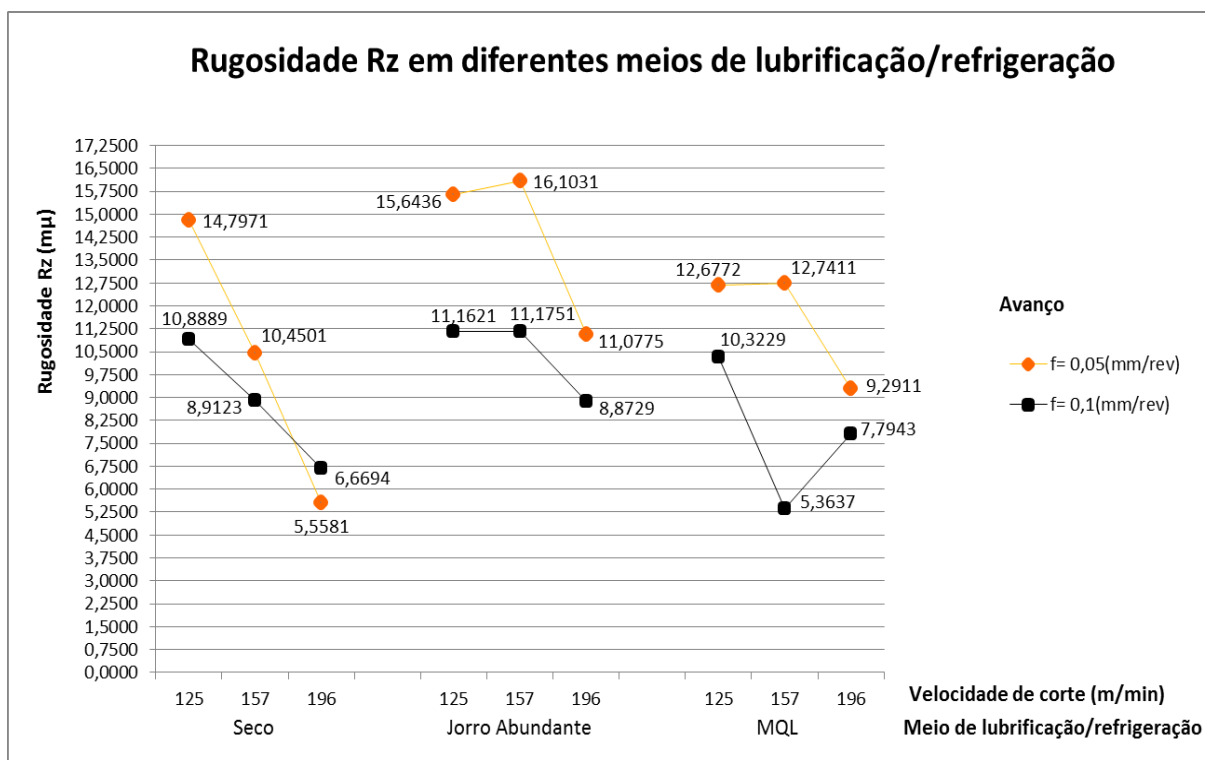


Gráfico 32 - Comparação da rugosidade Rz obtido nos três métodos de lubrificação/refrigeração

Fonte: Autoria própria.

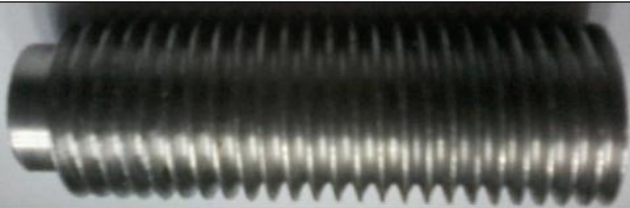



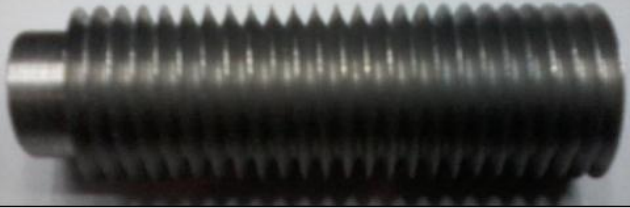
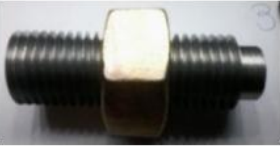
A mesma avaliação feita para os parâmetros Ra e Rq é feita à rugosidade Rz quanto ao uso de fluido de corte abundante, conclui-se a partir do Gráfico 32 que a rugosidade Rz aumentou em todas as velocidades de corte e avanço com o uso de fluido de corte abundante, no avanço de 0,05 mm/rev esse aumento foi mais relevante.

O uso da MQL em algumas condições de usinagem trouxe vantagens quanto a rugosidade Rz, foi na velocidade de 125 m/min no avanço de 0,05 mm/rev e nas velocidades de 125 m/min e 157 m/min no avanço de 0,1 mm/min. Nos demais casos o Rz aumentou. Percebe-se assim que a melhora do acabamento superficial levando em conta a rugosidade Rz aplicando a MQL ocorreram nas velocidades de corte mais baixa, mesmo comportamento observado para o Ra.

4.6.4 Acabamento da rosca

Quanto ao acabamento da rosca não foi possível medir sua rugosidade, devido à complexidade do formato da peça resultante do processo, então foi feita uma inspeção visual do acabamento obtido nos três meios de lubri-refrigeração e depois rosqueado uma porca em cada rosca para averiguar a facilidade de rosqueamento.

A rosca feita com MQL foi a que apresentou melhor acabamento, e melhor facilidade de rosqueamento. A Fotografia 23 mostra os detalhes das roscas nos três meios de lubri-refrigeração.

Meio de lubrificação/ refrigeração	Fotografia	
Seco		
Jorro Abundante		
MQL		

Fotografia 23 - Detalhes das roscas obtidas nos três meios de lubri-refrigeração
Fonte: Autoria própria.

O melhor acabamento com MQL no rosqueamento provavelmente esteja relacionado a boa lubrificação obtida com esse método. Com jorro abundante o resfriamento da peça ocasionou piora no cisalhamento do material para formação do

cavaco, como já justificado no item 4.6.1 pág. 110, piorando o acabamento. Já a seco pode ter ocorrido um emplastramento do material na formação do cavaco devido à alta temperatura resultante do atrito da ferramenta com a peça, ligado a ductilidade do material. A lubrificação com MQL ocasionou uma condição favorável para o corte já que não resfriou a peça e reduziu o atrito da ferramenta com a peça e consequentemente a temperatura.

5 CONCLUSÕES

Com base nas análises apresentadas no presente trabalho, concluir-se que:

- O desvio de circularidade foi menor ao utilizar maiores velocidades de corte;
- A usinagem a seco apresentou maiores valores de desvio de circularidade e paralelismo, em função do aquecimento gerado;
- As rugosidades Ra, Rq e Rz tiveram uma tendência a diminuir com o aumento da velocidade de corte, devido a facilidade na formação do cavaco;
- As rugosidades Ra, Rq e Rz aumentaram com fluido de corte abundante;
- A lubrificação com MQL reduziu o valor das rugosidades Ra e Rz nas velocidades de corte mais baixa e aumentou nas maiores velocidades;
- O avanço de 0,1 mm/rev apresentou menores valores de: desvio dimensional, desvio de circularidade e rugosidade Ra, Rq e Rz;
- No rosqueamento alcançou redução do desvio dimensional com uso de lubrificação/refrigeração com maior relevância na MQL;
- O torneamento com jorro de fluido abundante com as velocidades de corte e avanços ensaiados resultou em maior desgaste e lascamento da ferramenta de corte devido a frequentes choques térmicos;
- O desgaste da ferramenta de rosqueamento foi maior na usinagem a seco seguida do jorro abundante e menor desgaste com MQL;
- A usinagem com MQL trouxe as melhores condições de vida para ferramenta no rosqueamento e no torneamento;
- Os tipos de cavacos predominantes foram contínuos, devido ao material que se usinou, aço SAE 1045, e os parâmetros de usinagem utilizados;
- Quanto a forma do cavaco o aumento da velocidade de corte e do avanço tendeu aumentar o tamanho e emaranhar o cavaco. A usinagem com jorro de fluido abundante diminuiu o tamanho do cavaco e reduziu o emaranhamento.
- A coloração predominando nos cavacos foi azul escuro, devido ao alto aquecimento, colorações mais claras foram observadas com uso do jorro abundante em razão do resfriamento na saída do cavaco;

5.1 CONCLUSÃO DO OBJETIVO GERAL

Como discutido na seção 2.1, pág. 22, a usinabilidade de um material está relacionada a qual fator de interesse está sendo analisado e às condições de corte empregadas, com base nisso e no objetivo geral deste trabalho que foi analisar a influência do meio de lubrificação/refrigeração na usinabilidade do aço estudado, o Quadro 6 apresenta uma comparação de cada propriedade de usinagem estudada e reflete estas comparações para estimar em qual meio de lubrificação/refrigeração o material apresentou melhor usinabilidade.

O critério de classificação utilizado foi Melhor, intermediária e pior usinabilidade, esta classificação foi baseada nas análises dos resultados apresentados anteriormente.

Estimativa da usinabilidade dos Meios de lubri-refrigeração em relação aos fatores analisados			
Fator de interesse	Meio de lubrificação/refrigeração		
	Seco	Jorro abundante	MQL
Circularidade	Pior	Intermediária	Melhor
Paralelismo	Pior	Intermediária	Melhor
Rugosidade (Ra)	Melhor	Pior	Melhor
Rugosidade (Rq)	Melhor	Pior	Intermediária
Rugosidade (Rz)	Melhor	Pior	Melhor
Desvio dimensional	Pior	Pior	Melhor
Desgaste da ferramenta	Intermediária	Pior	Melhor
Desvio dimensional no rosqueamento	Pior	Intermediária	Melhor
Desgaste da ferramenta de rosqueamento	Pior	Intermediária	Melhor
Cavaco	Pior	Melhor	Intermediária

Quadro 6 – Resultado da usinabilidade para cada meio de lubrificação/refrigeração em cada fator resposta analisado

Fonte: A autoria própria.

A partir da análise do Quadro 6, pode-se concluir que, para as condições analisadas (velocidade de corte, avanço e processo de usinagem), o material estudado, aço SAE 1045, possui melhor usinabilidade usinando com MQL, seguida da usinagem a seco e pior usinabilidade com a utilização de jorro abundante.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Oswaldo Luiz; RODRIGUES, Antonio Carlos dos Santos; LIRANI, João. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

AGOSTINHO, Oswaldo L.; VILELLA, Ronaldo C.; BUTTON, Sérgio T. **Processos de fabricação e planejamento de processos**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/graduacao/EM335/apostila.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2013.

AMORIM, Heraldo J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidades e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3791/000343470.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 14 fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . **NBR 10004**:Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR%20n%2010004-2004.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2014.

_____. **NBR 6409**: tolerância geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. Rio de Janeiro, 1997.

BONANDI, Marcelo. **Estudo das condições de corte no torneamento do aço AISI M4 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.uninove.br/PDFs/Mestrados/Engenharia/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Defesa_Nov_2012_Final_Revisada.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2014.

BORNHOLD, Adelson; TORMES, Daniele; BENDER, Rodrigo; ALVES, Valtair J. **Análise da influência do material sobre o desgaste da ferramenta de usinagem**. Semana internacional das Engenharias da FAHOR, 2011. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011_Analise_Influencia_Material_Desgaste_Ferramenta_Usinagem.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2013.

BRASIL. **Resolução nº362**, de 23 de junho de 2005. Disponível em:
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=466>>.
Acesso em: 28 jan. 2014.

CARVALHO, Alessandra O. de. **Análise da dinâmica do processo de roscamento por conformação na liga de Magnésio AM60**. 2011. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2011. Disponível em : <[http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Alessandra_Olinda\(1\).pdf](http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Alessandra_Olinda(1).pdf)>. Acesso em: 12 set. 2014.

CASAGRANDA, Márcio V. **Estudo da usinabilidade do aço inoxidável austenítico AISI 303**. 2004. 25 f. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em:
<<http://www.mecanica.ufrgs.br/disciplinas/eng03381C/Trabalhos/m%C3%A1rcio%20casagranda.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2014.

CERATIZIT. **Ultimate tooling by pioneering spirit**: main catalogue. Disponível em:
<<http://www.ceratizit.com/services/downloads/>>. Acesso em: 20 mai.2014.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

DÓRIA, Marcelo A. T. **Análise da influência da rigidez do sistema nos erros dimensionais e geométricos no processo de torneamento**. 2005. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005. Disponível em:
<http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/unesp/94494/doria_mat_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 04 set. 2014.

ESPANHOL, Victor. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. 2008. 96 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em:
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14374/000665234.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

FERNANDES, João C. **Óleos de usinagem**: tipos, classificação e desempenho. Bauru: universidade Estadual Paulista, 2010. Disponível em:
<http://www.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_18.pdf>. Acesso em: 08 set. 2014.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

FERREIRA, João C. E. **Precisão e Erros de Usinagem**. UFSC, [s. d.]. Disponível em: <http://www.grima.ufsc.br/capp/apostila/Cap2ApostCAPP_v2.pdf>. Acesso em 03 set. 2014.

GORDO, Nívia; FERREIRA, Joel. **Telecurso 2000 profissionalizante: Mecânica, Elementos de Máquina**, volume 1. São Paulo: Globo, 1996.

HEMUS. **A técnica da Ajustagem**. [S.l.]: 2004.

INTRODUÇÃO aos processos de usinagem. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte_arquivos/Historicousinagem.pdf>. Acesso em: 31 dez 2013.

ISVOR FIAT. **Torneiro mecânico tecnologia**. Minas Gerais: FIEMG; SENAI. Disponível em: <http://edisoncarlos.xpg.uol.com.br/Usinagem_arquivos/TMT%20004.pdf>. Acesso em: 06 set. 2014.

JULIO, Vilmar. **Avaliação da redução do uso de fluido de corte no processo de alargamento de ferro fundido vermicular**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Tupy, Joinville, 2009. Disponível em: <www.sociesc.org.br/download/?tipo=anx&count=1&id=3039>. Acesso em: 08 set. 2014.

KLAUBERG, André L. **Aplicação de mínimas quantidades de fluido de corte nos processos de furação e rosqueamento interno de eixos para motores elétricos**. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/92744/269689.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 06 set. 2014.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

MATWEB. **Property Search**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b194a96080b6410ba81734b094a4537c&ckck=1>>. Acesso em: 15 mai. 2014.

MICARONI, Ricardo, DINIZ, Anselmo E. Economizando energia elétrica e fluido de corte no torneamento de aço. **O mundo da usinagem**: publicação da divisão Coromant da Sandvik do Brasil, São Paulo, p.4-7, 1.2002. Disponível em: <<http://www.omundodausinagem.com.br/pdf/9.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2014.

MICARONI, Ricardo. **Influência do Fluido de corte sob pressão no torneamento do aço ABNT 1045**. 2006. 167 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000391681&fd=y>>. Acesso em: 16 ago. 2014.

MITUTOYO. **Medidor de Rugosidade Superficial Modelo SJ-210**: Manual do Usuário. No. 99MBB122A SERIES No. 178, 2009. 406 p. Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com.ar/nueva/lancamentos/pdf/MANUAL-SJ-210.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2014.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2. ed. Tradução: Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

NOVASKI, Olívio. **Introdução À Engenharia De Fabricação Mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

OLIVEIRA, Danilo De J. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2011. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bba/33004056083P7/2011/oliveira_dj_me_bauru.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2013.

OLIVEIRA, José Eduardo F. de.; MESQUITA, Noemia G. de M. de; YADAVA, Yogendra P. Tolerâncias dimensionais de peças usinadas com pastilhas cerâmicas – um estudo de caso. Universidade de Pernambuco, [2007]. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2007/files/011124302.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2014.

PAULA, Leonam J. L. de. **Estudo e desenvolvimento de sistema de refrigeração MQL (mínima quantidade de lubrificantes)**. 5ª Mostra acadêmica UNIMEP, 23 – 25 out. 2007. Disponível em: <<http://www.unimep.br/phpg/mostraacademica/anais/5mostra/1/498.pdf>>. Acesso em: 24 dez.2013.

PAULO, Rafael Gustavo da Rocha; ARRUDA, Diego Lucas de; MANERA, Rodolfo da Silva; MATSUMOTO, Hidekasu; RODRIGUES, Alessandro Roger. **Influência da velocidade de corte sobre o acabamento superficial no fresamento do aço SAE 4118H modificado**. XIV congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/creem/2007/PDF/0033.PDF>>. Acesso em: 08 set. 2014.

PEREIRA, Janaína Aparecida; SILVA, Flávia Cristina Sousa e; FERREIRA, Camila Corrêa Martins; SILVA, Márcio Bacci da. **Análise do torneamento do aço inoxidável ABNT 304 através da temperatura do cavaco**. 17º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Disponível em: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/17/PDF/55.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2013.

PROJETO programa piloto para a minimização dos impactos gerados por resíduos perigosos. **Gestão de resíduos fluidos de usinagem**- Documento 3. Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: <http://wwwapp.sistemafiergs.org.br/portal/page/portal/sfiergs_senai_uos/senairs_uo697/proximos_cursos/Fluidos%20de%20usinagem_RS.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2013.

REIS, Alexandre M. **Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte**. 2000. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/38/1/InfluenciaAnguloPosicao.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2014.

SÁ, Vinícius M. de. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de diâmetros diferentes**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_SaVM_1.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2014.

SEVERINO, Geremias. **Otimização do torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico utilizando ferramenta de metal duro com geometria especial**. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011. Disponível em: <<http://juno.unifei.edu.br/bim/0038601.pdf> >. Acesso em: 18 fev. 2014.

SILVA, Flávia C. S. e; SILVA, Márcio B. da. **Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304 através do estudo da formação do cavaco**. 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/16/PDF/PM16-0097.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

SILVA, Ricardo A. da; NETO Antonio F. **Estudo da microestrutura do aço SAE 1045 para a melhoria da usinabilidade**: uma proposta para a gestão dos processos de usinagem. 4º Congresso Internacional de Cooperação Universidade-Indústria, Taubaté, 5 - 7 dez. 2012. Disponível em: <<http://www.unitau.br/unindu/artigos/pdf574.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2014.

SOUZA, André J. de. **Processos de fabricação por usinagem**: parte 1. [Porto Alegre]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <http://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2013.

SPATH, Dieter. **Application of minimum quantity cooling lubrication technology in cutting processes**. Production Engineering Vol. III, p.49-54,1994. Disponível em: <<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5072/pdf/hei135.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2014.

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de corte I**. 4. ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995.

_____. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995.

TEDESCO, Marcelo E. **Variação dimensional e micro estrutural do aço AISI 4140 em peças usinadas por torneamento**. 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007. Disponível em: <http://tede.uces.br/tde_arquivos/6/TDE-2007-10-08T130412Z-149/Publico/Dissertacao%20Marcelo%20E%20Tedesco.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2014.

UTFPR. **Normas Para Elaboração De Trabalhos Acadêmicos**. Reitoria, 2008.

YAMAKAMI, Wyser José; SOUZA, Franco Luiz Castilho de; RODRIGUES, Alessandro Roger; PAULO, Rafael Gustavo da Rocha. **Avaliação do processo de formação de cavaco no torneamento do aço ABNT 1045**. Faculdade de Engenharia Ilha Solteira, [2006?]. Disponível em:

<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/franco_cicunesp2006.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2014.

ZEILMANN, Rodrigo P.; VACARO, Tiago; BORDIN, Fernando M.; SONDA, Vania. **Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte**. Universidade de Caxias do Sul, [2009?]. Disponível em: <<http://www.aea.org.br/aea2009/downloads/simea09/pap/PAP0021.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2014.

ZEILMANN, Rodrigo P.; VACARO, Tiago. **Aplicação de brocas de aço-rápido na usinagem a seco do aço AISI P20**. Estudos Tecnológicos- Vol. 4, n° 3, p. 180-187, set/dez. 2008. Disponível em: <revistas.unisinos.br/index.php/estudos_tecnologicos/article/view/.../2748>. Acesso em: 24 dez. 2013.

APÊNDICE A

A.1 CÁLCULO DA VAZÃO DO MÉTODO DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO POR JORRO DE FLUIDO ABUNDANTE

Amostra	Quantidade	Tempo
1°	900 ml	60 segundos
2°	900 ml	65 segundos
3°	900 ml	54 segundos

Quadro 7 - Tempo das amostras para cálculo da vazão no sistema jorro abundante
Fonte: Autoria própria.

Fórmula da vazão = volume/tempo

Vazão da 1° Amostra = $900 \text{ ml}/60\text{s} = 15 \text{ ml/s} \cdot 60 = 900 \text{ ml/min}$

Vazão da 2° Amostra = $900 \text{ ml}/65\text{s} = 13,8 \text{ ml/s} \cdot 60 = 828 \text{ ml/min}$

Vazão da 3° Amostra = $900 \text{ ml}/54\text{s} = 16,67 \text{ ml/s} \cdot 60 = 1000 \text{ ml/min}$

Média = $(900+828+1000)/3 = 2728/3 = 909,33 \text{ ml/min} \cdot 60 = 54560 \text{ ml/hora}$

Vazão média = $(54560 \text{ ml/h})/1000 = \mathbf{54,5 \text{ litros/hora}}$

A.2 CÁLCULO DA VAZÃO DO MÉTODO DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO MQL

Massa do Becker = 257,8 gramas

Massa do Becker com 300 ml de fluido para MQL = 552,7 gramas

Massa de 300 ml de fluido = $552,7 - 257,8 = 294,9 \text{ gramas}$

Fórmula da densidade = massa/volume

Densidade do fluido = $294,9\text{g}/300\text{ml} = \mathbf{0,983 \text{ g/ml}}$

Coleta de fluido no Becker com estopas

Massa do Becker com estopas = 283,6 gramas

Amostra	Massa do conjunto Becker-estopa-fluido	Tempo
1°	290,6 g	5 minutos
2°	291 g	5 minutos
3°	291,3 g	5 minutos

Quadro 8 - Massa do conjunto Becker- estopa-fluido para cálculo da vazão no sistema MQL
Fonte: Autoria própria.

Massa do fluido na 1° amostra = $290,6\text{g} - 283,6\text{g} = 7,0\text{g}$

Massa do fluido na 2° amostra = $291\text{g} - 283,6\text{g} = 7,4\text{g}$

Massa do fluido na 3° amostra = $291,3\text{g} - 283,6\text{g} = 7,7\text{g}$

Quantidade de fluido da 1° amostra = $7,0\text{g}/0,983\text{g/ml} = 7,121\text{ml}$

Quantidade de fluido da 2° amostra = $7,4\text{g}/0,983\text{g/ml} = 7,528\text{ml}$

Quantidade de fluido da 3° amostra = $7,7\text{g}/0,983\text{g/ml} = 7,833\text{ml}$

Vazão da 1° amostra = $7,121\text{ml}/5\text{min} = 1,424\text{ml/min} * 60 = 85,44\text{ ml/h}$

Vazão da 2° amostra = $7,528\text{ml}/5\text{min} = 1,505\text{ml/min} * 60 = 90,3\text{ ml/h}$

Vazão da 3° amostra = $7,833\text{ml}/5\text{min} = 1,566\text{ml/min} * 60 = 93,96\text{ ml/h}$

Vazão média = $(85,44 + 90,3 + 93,96)/3 = 269,7/3 = 89,9\text{ ml/hora}$

Vazão do MQL é igual a aproximadamente **90 ml/hora**

APÊNDICE B

B.1 CODIFICAÇÃO DOS ENSAIOS

Para maior facilidade e organização durante a sua realização, os ensaios foram codificados. O Quadro 9 mostra a codificação dos ensaios do torneamento e o Quadro 10 para o roscamento.

Codificação dos ensaios do torneamento				
Nº Ensaio	Cond. de lubri-refrig.	Avanço(mm/rev)	Vel. Corte(m/min)	Rotação(rpm)
1	seco	0,05	125	800
2	seco	0,05	157	1000
3	seco	0,05	196	1250
4	seco	0,1	125	800
5	seco	0,1	157	1000
6	seco	0,1	196	1250
7	Jorro abuntante	0,05	125	800
8	Jorro abuntante	0,05	157	1000
9	Jorro abuntante	0,05	196	1250
10	Jorro abuntante	0,1	125	800
11	Jorro abuntante	0,1	157	1000
12	Jorro abuntante	0,1	196	1250
13	MQL	0,05	125	800
14	MQL	0,05	157	1000
15	MQL	0,05	196	1250
16	MQL	0,1	125	800
17	MQL	0,1	157	1000
18	MQL	0,1	196	1250

Quadro 9 - Codificação dos ensaios de torneamento

Fonte: Autoria própria.

Codificação dos ensaios do roscamento	
Nº ensaio	Cond. de lubri-refrig.
1	seco
2	Jorro abuntante
3	MQL

Quadro 10 - Codificação dos ensaios de roscamento

Fonte: Autoria própria.

Outra codificação utilizada foi para as replicas, para o torneamento foi utilizado R1, R2 e R3, precedido do numero do ensaio. (ex.: 3R1, 3R2 e 3R3 para as 1º, 2º e 3º replicas dos ensaios de numero 3). Para o roscamento foi utilizado as letra RC antes do código da réplica. (ex.: RC1R3 para a terceira réplica do ensaio 1).

APÊNDICE C

Os resultados referentes a cada medição, réplica, média e desvio padrão de cada ensaio para cada critério de usabilidade são apresentados nos Quadros que seguem, utilizando para identificação dos ensaios a codificação descrita no Quadro 9.

C.1 DESVIO DE CIRCULARIDADE

Desvio de Circularidade																									
N° ensaio	Réplica	Medições (mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão								
1	1R1	0,01	0,025	0,0277	0,0031	4	4R1	0,03	0,0216	0,0187	0,0037	7	7R1	0,015	0,0106	0,0107	0,0010								
		0,07						0,02						0,01											
		0,02						0,02						0,01											
		0,005						0,018						0,008											
	1R2	0,01	0,032				0,025	4R2	0,02				0,021	0,02	7R2			0,01	0,0096	0,0037	7R2	0,008	0,0096	0,0107	0,0010
		0,02							0,02									0,01							
		0,07							0,02									0,01							
		0,03							0,02									0,01							
	1R3	0,02	0,026				0,025	4R3	0,01				0,0134	0,01	7R3			0,025	0,012	0,0037	7R3	0,005	0,012	0,0107	0,0010
		0,02							0,02									0,015							
		0,03							0,01									0,005							
		0,02							0,012									0,005							
2	2R1	0,005	0,009	0,0173	0,0111	5	5R1	0,015	0,0152	0,0121	0,0064	8	8R1	0,01	0,009	0,0117	0,0025								
		0,01						0,018						0,01											
		0,01						0,015						0,005											
		0,01						0,018						0,01											
	2R2	0,04	0,033				0,02	5R2	0,02				0,018	0,02	8R2			0,02	0,015	0,0064	8R2	0,015	0,015	0,0117	0,0025
		0,04							0,01									0,02							
		0,035							0,02									0,01							
		0,03							0,02									0,01							
	2R3	0,01	0,01				0,002	5R3	0,002				0,0032	0,002	8R3			0,01	0,011	0,0064	8R3	0,015	0,011	0,0117	0,0025
		0,01							0,002									0,01							
		0,01							0,005									0,01							
		0,01							0,002									0,015							
3	3R1	0,01	0,008	0,0097	0,0024	6	6R1	0,002	0,0084	0,0081	0,0016	9	9R1	0	0,004	0,0069	0,0025								
		0,005						0,01						0,005											
		0						0,01						0,005											
		0,025						0,01						0,01											
	3R2	0,05	0,013				0,005	6R2	0,01				0,01	0,005	9R2			0,005	0,0066	0,0016	9R2	0,005	0,0066	0,0069	0,0025
		0,005							0,01									0,005							
		0,005							0,01									0,01							
		0,005							0,01									0,008							
	3R3	0,005	0,008				0,005	6R3	0,005				0,006	0,005	9R3			0,01	0,01	0,0016	9R3	0,01	0,01	0,0069	0,0025
		0,01							0									0,01							
		0,01							0,005									0,01							
		0,005							0,01									0,01							

Quadro 11 - Desvio de circularidade dos ensaios 1 ao 9 no torneamento

Fonte: Autoria própria.

Desvio de Circularidade																			
N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão		
10	10R1	0,005	0,006			13	13R1	0,01	0,017			16	16R1	0,005	0,0016				
		0,01						0											
		0,005						0											
		0,005						0,003											
	10R2	0,005	0,005	0,0052	0,0006		13R2	0,01	0,015	0,0167	0,0012		16R2	0,005	0,015	0,0072	0,0057		
		0,005						0,005											
		0,005						0,03											
		0,005						0,03											
	10R3	0,005	0,0046				13R3	0,015	0,018				16R3	0,005	0,005				
		0,005						0,005											
		0,004						0,005											
		0,004						0,005											
11	11R1	0,015	0,006			14	14R1	0,015	0,016			17	17R1	0	0,0036				
		0,005						0,005											
		0,005						0,005											
		0,005						0,003											
	11R2	0,01	0,009	0,0053	0,0033		14R2	0,005	0,005	0,0080	0,0057		17R2	0,005	0,0058	0,0065	0,0027		
		0,01						0,009											
		0,01						0,005											
		0,005						0,005											
	11R3	0	0,001				14R3	0,005	0,003				17R3	0,01	0,01				
		0						0,005											
		0						0,005											
		0,005						0,01											
12	12R1	0,02	0,0178			15	15R1	0	0,001			18	18R1	0,005	0,005				
		0,02						0,005											
		0,015						0,005											
		0,014						0,005											
	12R2	0,01	0,018	0,0146	0,0047		15R2	0,005	0,001	0,0023	0,0019		18R2	0,005	0,004	0,0047	0,0005		
		0,03						0											
		0,02						0											
		0,02						0											
	12R3	0,005	0,008				15R3	0,005	0,005				18R3	0,01	0,005				
		0,01						0,005											
		0,005						0,005											
		0,01						0,005											

Quadro 12 - Desvio de circularidade dos ensaios 10 ao 18 no torneamento
Fonte: Autoria própria.

C.2 DESVIO DE PARALELISMO

Desvio de Paralelismo																									
N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão								
1	1R1	0,025	0,025	0,0297	0,0119	4	4R1	0,045	0,041	0,0563	0,0109	7	7R1	0,02	0,02	0,0395	0,0141								
		0,025						0,04						0,02											
		0,025						0,035						0,02											
		0,025						0,045						0,02											
	1R2	0,05	0,046				0,06	0,065	0,0624				0,0654	4R2	0,065			0,0654	0,0563	0,0109	7R2	0,05	0,053	0,0395	0,0141
		0,04													0,065							0,055			
		0,045													0,065							0,06			
		0,055													0,062							0,05			
	1R3	0,04	0,018				0,02	0,06	0,065				0,0654	4R3	0,09			0,0654	0,0563	0,0109	7R3	0,055	0,0456	0,0395	0,0141
		0,02													0,09							0,048			
		0,02													0,057							0,04			
		0,015													0,055							0,045			
2	2R1	0,04	0,045	0,0360	0,0070	5	5R1	0,075	0,069	0,0657	0,0054	8	8R1	0,035	0,032	0,0200	0,0098								
		0,04						0,06						0,03											
		0,05						0,06						0,035											
		0,05						0,06						0,03											
	2R2	0,045	0,028				0,03	0,06	0,058				0,0657	5R2	0,09			0,058	0,0657	0,0054	8R2	0,02	0,008	0,0200	0,0098
		0,025													0,055							0,02			
		0,03													0,06							0,02			
		0,03													0,06							0,02			
	2R3	0,025	0,035				0,035	0,065	0,07				0,0657	5R3	0,065			0,07	0,0657	0,0054	8R3	0,02	0,02	0,0200	0,0098
		0,035													0,065							0,02			
		0,035													0,075							0,02			
		0,035													0,07							0,02			
3	3R1	0,03	0,032	0,0333	0,0019	6	6R1	0,04	0,043	0,0615	0,0132	9	9R1	0,035	0,036	0,0289	0,0066								
		0,03						0,05						0,04											
		0,035						0,04						0,035											
		0,035						0,035						0,03											
	3R2	0,03	0,036				0,035	0,067	0,0684				0,0615	6R2	0,067			0,0684	0,0615	0,0132	9R2	0,035	0,0306	0,0289	0,0066
		0,04													0,07							0,03			
		0,03													0,07							0,025			
		0,035													0,07							0,033			
	3R3	0,04	0,032				0,075	0,07	0,073				0,0615	6R3	0,07			0,073	0,0615	0,0132	9R3	0,03	0,02	0,0289	0,0066
		0,03													0,075							0,02			
		0,03													0,07							0,02			
		0,035													0,075							0,02			
3R3	0,035	0,032	0,075	0,075	0,073	0,0615	6R3	0,075	0,073	0,0615	0,0132	9R3	0,02	0,02	0,0289	0,0066									
	0,03							0,075					0,02												
	0,035							0,075					0,02												
	0,03							0,075					0,02												

Quadro 13 - Desvio de paralelismo dos ensaio 1 ao 9 no torneamento

Fonte: Autoria própria.

Desvio de Paralelismo																									
N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições(mm)	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão								
10	10R1	0,015	0,015	0,0287	0,0104	13	13R1	0,01	0,008	0,0067	0,0012	16	16R1	0,03	0,038	0,0417	0,0029								
		0,01						0,005						0,04											
		0,015						0,015						0,04											
		0,015						0,005						0,04											
		0,02						0,005						0,04											
	10R2	0,04	0,04				0,04	0,015	0,007				13R2	0,015	0,005			0,005	0,045	0,042	16R2	0,045	0,045	0,045	
		0,04												0,005								0,04			
		0,04												0,015								0,04			
		0,04												0								0,04			
	10R3	0,03	0,0312				0,0312	0,005	0,005				13R3	0,005	0,005			0,005	0,045	0,045	16R3	0,045	0,045	0,045	
		0,03												0,005								0,045			
		0,033												0,005								0,045			
11	11R1	0,03	0,038	0,0427	0,0034	14	14R1	0,06	0,052	0,0313	0,0150	17	17R1	0,04	0,04	0,0343	0,0080								
		0,04						0,05						0,04											
		0,04						0,05						0,04											
		0,04						0,05						0,04											
	11R2	0,045	0,044				0,044	0,03	0,025				14R2	0,03	0,025			0,025	0,0313	0,0150	17	17R2	0,04	0,04	0,04
		0,04												0,03									0,04		
		0,045												0,025									0,04		
		0,04												0,02									0,04		
	11R3	0,04	0,046				0,046	0,015	0,017				14R3	0,015	0,017			0,017	0,0313	0,0150	17	17R3	0,02	0,023	0,023
		0,05												0,02									0,025		
		0,04												0,015									0,02		
		0,05												0,02									0,02		
12	12R1	0,015	0,015	0,0227	0,0116	15	15R1	0,03	0,03	0,0283	0,0039	18	18R1	0,025	0,027	0,0257	0,0042								
		0,015						0,03						0,025											
		0,015						0,03						0,025											
		0,01						0,03						0,03											
		0,02						0,03						0,03											
	12R2	0,015	0,014				0,014	0,03	0,032				15R2	0,03	0,032			0,0283	0,0039	18	18R2	0,02	0,02	0,02	
		0,015												0,04								0,02			
		0,015												0,03								0,02			
		0,01												0,03								0,02			
	12R3	0,04	0,039				0,039	0,025	0,023				15R3	0,025	0,023			0,0283	0,0039	18	18R3	0,03	0,03	0,03	
		0,04												0,025								0,03			
		0,035												0,03								0,03			

Quadro 14 - Desvio de paralelismo dos ensaios 10 ao 18 no torneamento
Fonte: Autoria própria.

C.3 DESVIO DIMENSIONAL

Desvio dimensional no torneamento									
N° ensaio	Réplica	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Média das medições nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão
1	1R1	0,394	0,1480	0,1743	10	10R1	0	0,0000	0,0000
	1R2	0,038				10R2	0		
	1R3	0,012				10R3	0		
2	2R1	0,16	0,0553	0,0741	11	11R1	0,06	0,0307	0,0245
	2R2	0,006				11R2	0,032		
	2R3	0				11R3	0		
3	3R1	0,296	0,1420	0,1204	12	12R1	0	0,0067	0,0094
	3R2	0,128				12R2	0		
	3R3	0,002				12R3	0,02		
4	4R1	0,042	0,0180	0,0173	13	13R1	0,011	0,0087	0,0033
	4R2	0,01				13R2	0,004		
	4R3	0,002				13R3	0,011		
5	5R1	0,04	0,0140	0,0184	14	14R1	0,206	0,0687	0,0971
	5R2	0				14R2	0		
	5R3	0,002				14R3	0		
6	6R1	0,044	0,0153	0,0203	15	15R1	0,028	0,0100	0,0128
	6R2	0,002				15R2	0,002		
	6R3	0				15R3	0		
7	7R1	0,144	0,0493	0,0670	16	16R1	0,012	0,0667	0,0845
	7R2	0,004				16R2	0,002		
	7R3	0				16R3	0,186		
8	8R1	0,052	0,0353	0,0250	17	17R1	0	0,0233	0,0302
	8R2	0,054				17R2	0,004		
	8R3	0				17R3	0,066		
9	9R1	0,008	0,0207	0,0223	18	18R1	0,19	0,0647	0,0886
	9R2	0,002				18R2	0		
	9R3	0,052				18R3	0,004		

Quadro 15 - Desvio dimensional no torneamento

Fonte: Autoria própria.

Desvio dimensional no roscamento						
Nº Ensaio	Réplica	Diâmetro externo(mm)	Médias das réplicas (mm)	Desvio dimensional (mm)	Média entre as réplicas (mm)	Desvio Padrão
1	RC1R1	30,089	29,9948	0,2948	0,4571	0,1251
		29,959				
		29,944				
		30,008				
		29,974				
	RC1R2	30,252	30,2992	0,5992		
		30,351				
		30,467				
		30,251				
		30,175				
	RC1R3	29,945	30,1774	0,4774		
		30,12				
		30,041				
		30,448				
		30,333				
2	RC2R1	29,952	29,9562	0,2562		
		30,125				
		29,999				
		30,04				
		29,665				
	RC2R2	29,834	29,8934	0,1934		
		29,808				
		30,219				
		29,786				
		29,82				
	RC2R3	30,396	30,3064	0,6064		
		30,291				
		30,275				
		30,267				
		30,303				
3	RC3R1	29,772	29,749	0,049		
		29,789				
		29,772				
		29,712				
		29,7				
	RC3R2	30,025	29,9738	0,2738		
		29,998				
		29,995				
		29,968				
		29,883				
	RC3R3	29,72	29,7096	0,0096		
		29,705				
		29,745				
		29,675				
		29,703				

Quadro 16 - Desvio dimensional no roscamento

Fonte: Autoria própria.

C.4 RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra

Rugosidade Ra																										
N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão									
1	1R1	2,391	2,2706	2,2757	0,0072	4	4R1	2,084	1,8514	1,8008	0,1674	7	7R1	1,923	1,925	2,6311	0,6146									
		2,578						1,861						1,677												
		2,241						1,813						1,995												
		1,976						1,867						1,967												
		2,167						1,632						2,063												
	1R2	2,391	2,2706				1,744	1,9758	2,021				2,084	2,101	1,9752			1,89	1,592	1,359	1,136	1,899	2,337	2,488	2,5452	
		2,578					1,929																			3,402
		2,241					2,021																			3,297
		1,976					2,084																			3,461
	1R3	2,203	2,2858				1,6358	0,4085	5				5R2	1,092	1,127			1,4448	0,2588	8	8R2	3,319	4,095	3,1251	0,8841	
		2,281												1,887								4,151				
		2,222												1,893								4,339				
		2,64												1,075								4,09				
		2,083												1,714								4,576				
		2												2R1								2,246				2,1508
2,046	1,018		1,865																							
2,38	1,323		2,091																							
1,998	0,938		2,047																							
2R2	0,943		1,1516	1,6358	0,4085	5	5R3	1,714	1,4464	1,4448	0,2588	8	8R3	2,828	4,095	3,1251	0,8841									
	0,853							1,497						3,479												
	1,314							1,075						4,576												
	1,272							1,714						2,828												
	1,376							1,497						3,479												
	1,578							1,329						3,138												
3	3R1	0,796	0,8974	0,8027	0,0720	6	6R3	0,992	0,957	0,9135	0,0997	9	9R3	2,652	2,4124	1,8855	0,4556									
		0,88						0,91						2,24												
		0,956						1,01						2,054												
		0,919						0,881						2,383												
		0,936						0,992						2,733												
	3R2	0,787	0,7876	0,8027	0,0720	6	6R2	0,938	1,008	0,9135	0,0997	9	9R2	1,734	1,9432	1,8855	0,4556									
		0,713						0,872						1,979												
		0,776						0,889						1,734												
3R3	0,792	0,723	0,8027	0,0720	6	6R3	0,992	0,957	0,9135	0,0997	9	9R3	2,652	2,4124	1,8855	0,4556										
	0,870						0,91						2,24													
	0,752						1,01						2,054													
	0,755						0,881						2,383													
	0,731						0,992						2,733													

Quadro 17 - Rugosidade Ra dos ensaios 1 ao 9 no torneamento

Fonte: Autoria própria.

Rugosidade Ra																										
N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão									
10	10R1	1,971	1,3044	1,9301	0,4506	13	13R1	2,166	1,52	2,1655	0,4735	16	16R1	1,74	1,6652	1,6797	0,0987									
		1,705						1,18						1,28												
		0,868						1,299						1,697												
		0,775						1,791						1,997												
		1,203						1,164						1,612												
	10R2	1,969	2,1382				2,543	2,3336	2,1655				0,4735	16R2	1,776			1,5668	1,6797	0,0987	1,471	1,546	1,5668	1,6797	0,0987	
		2,1					2,37								1,543											
		2,15					2,031								1,543											
		2,283					1,704								1,498											
	10R3	2,189	2,3476				2,6428	2,1655	0,4735				16R3	3,02	2,6428			2,1655	0,4735	16R3	1,782	1,8072	1,8072	1,8072	1,8072	1,8072
		2,187												2,681							1,595					
		2,195												2,888							1,959					
		2,226												2,448							1,826					
		2,376												2,539							1,874					
		2,754												2,658							1,874					
11	11R1	1,199	1,1966	1,8690	0,4822	14	14R1	2,013	2,148	2,0643	0,3475	17	17R1	0,875	0,8462	0,8689	0,0598									
		1,202						1,905						0,834												
		1,084						3,18						0,813												
		1,355						1,349						0,841												
		1,143						2,293						0,868												
	11R2	1,941	2,3038				2,4418	2,0643	0,3475				17R2	3,259	2,4418			2,0643	0,3475	17R2	0,966	0,9508	0,8689	0,0598		
		2,336												2,14							0,854					
		2,174												2,273							1,007					
		2,633												1,887							0,92					
	11R3	2,435	2,1066				1,603	2,0643	0,3475				17R3	2,65	1,603			2,0643	0,3475	17R3	1,007	0,8098	0,8098	0,8098	0,8098	0,8098
		2,209												1,799							0,878					
		2,01												1,492							0,771					
		2,353												1,472							0,814					
		2,205												1,494							0,819					
		1,756												1,758							0,767					
12	12R1	1,182	1,5638	1,5082	0,5516	15	15R1	1,452	1,3116	1,4958	0,6503	18	18R1	1,106	1,118	1,2169	0,0719									
		1,697						1,099						1,136												
		1,599						1,159						1,069												
		1,652						1,119						1,102												
		1,689						1,729						1,177												
	12R2	0,943	0,8066				0,8076	1,4958	0,6503				18R2	0,813	0,8076			1,4958	0,6503	18R2	1,22	1,2456	1,2456	1,2169	0,0719	
		0,801												0,829							1,207					
		0,089												0,833							1,25					
		1,378												0,767							1,241					
	12R3	0,822	2,1542				2,3682	1,4958	0,6503				18R3	0,796	2,3682			1,4958	0,6503	18R3	1,31	1,287	1,287	1,287	1,287	
		2,054												1,989							1,41					
		2,174												2,462							1,487					
		2,226												3,3							1,145					
		2,228												2,013							1,173					
		2,089												2,077							1,220					

Quadro 18 - Rugosidade Ra dos ensaios 10 ao 18 no torneamento

Fonte: Autoria própria.

C.5 RUGOSIDADE SUPERFICIAL Rq

Rugosidade Rq																	
N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão
1	1R1	1,832	2,1056	2,3639	0,2288	4	4R1	2,018	1,827	1,7762	0,0544	7	7R1	2,5	2,2654	3,0835	0,6909
		1,654						2,003						1,911			
		1,944						1,56						1,878			
		2,985						1,617						2,449			
		2,113						1,937						2,589			
	1R2	2,82	2,3242				1,683	1,7008	4,351								
		2,18					1,771		4,084								
		2,321					1,867		3,644								
		2,079					1,585		3,14								
		2,221					1,598		4,557								
	1R3	2,543	2,6618				2,338	1,8008	2,989								
		2,889					1,939		3,157								
		2,873					1,723		3,209								
		2,367					1,409		2,833								
		2,637					1,595		2,962								
2	2R1	0,887	0,8748	1,3931	0,3852	5	5R1	1,909	2,09	1,9719	0,3043	8	8R1	3,021	2,8012	3,8689	0,9362
		0,922						1,992						3,128			
		1,438						1,991						2,622			
		0,586						2,29						2,106			
		0,541						2,268						3,129			
	2R2	1,296	1,5068				1,407	1,5544	4,149								
		1,085					1,233		5,081								
		1,677					1,376		5,429								
		1,623					2,361		5,07								
		1,853					1,395		5,675								
	2R3	1,577	1,7976				3,986	2,2712	3,401								
		1,758					1,867		4,272								
		2,187					2,183		3,735								
		2,071					1,405		4,022								
		1,395					1,915		3,194								
3	3R1	0,966	1,6312	1,2029	0,3030	6	6R1	1,583	1,4968	1,4314	0,0569	9	9R1	1,887	1,6378	2,3360	0,5436
		1,133						1,476						1,626			
		1,142						1,611						1,707			
		3,219						1,114						1,357			
		1,696						1,7						1,612			
	3R2	0,94	0,9768				1,291	1,4392	2,237								
		0,895					1,65		2,663								
		1,005					1,965		2,467								
		0,980					1,15		2,178								
		1,064					1,14		2,488								
	3R3	0,936	1,0006				1,471	1,3582	3,252								
		1,221					1,151		2,794								
		0,903					1,281		2,635								
		0,895					1,55		2,885								
		1,048					1,338		3,252								

Quadro 19 - Rugosidade Rq dos ensaios 1 ao 9 no torneamento

Fonte: Autoria própria.

Rugosidade Rq																	
N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão
10	10R1	2,552	1,713	2,3305	0,4624	13	13R1	2,682	1,9202	2,6531	0,5387	16	16R1	2,152	2,124	2,1051	0,1303
		2,261						1,556						1,661			
		1,126						1,617						2,091			
		1,013						2,269						2,621			
		1,613						1,477						2,095			
	10R2	2,441	2,4528				3,151	2,8394	2,214				1,937	1,814			
		2,605					2,871		1,925								
		2,174					2,508		1,902								
		2,289					2,093		1,83								
		2,755					3,574		2,224								
	10R3	2,676	2,8256				3,264	3,1998	1,988				2,2544	1,988			
		2,452					2,78		2,443								
		2,635					3,136		2,248								
		2,996					3,354		2,369								
		3,369															
11	11R1	1,607	1,792	2,4822	0,4889	14	14R1	2,498	2,7028	2,5587	0,4714	17	17R1	1,075	1,9798	1,4493	0,3898
		1,765						2,337						3,067			
		1,941						4,23						3,585			
		1,71						1,661						1,08			
		1,937						2,788						1,092			
	11R2	2,353	2,8636				4,088	3,0504	1,252				1,3138	1,077			
		2,903					2,702		1,666								
		2,699					2,846		1,286								
		3,377					2,333		1,288								
		2,986					3,283		1,288								
	11R3	2,817	2,791				2,374	1,923	1,045				1,0544	0,96			
		3,125					1,686		0,999								
		3,047					1,854		1,021								
		2,769					1,862		1,247								
		2,197					1,839										
12	12R1	1,496	1,9622	1,9309	0,6209	15	15R1	1,841	1,687	2,0663	0,4677	18	18R1	1,35	1,5367	1,5367	0,1379
		2,081						1,398						1,364			
		1,979						1,445						1,312			
		2,053						1,448						1,331			
		2,202						2,303						1,465			
	12R2	0,995	1,1552				1,675	1,7866	1,513				1,5436	1,492			
		0,985					2,275		1,549								
		0,959					2,002		1,539								
		1,818					1,922		1,625								
		1,019					1,059		1,625								
	12R3	2,514	2,6752				2,511	2,7252	2,223				1,702	1,89			
		2,639					3,2		1,409								
		2,88					2,68		1,475								
		2,82					2,592		1,513								
		2,523					2,643										

Quadro 20 - Rugosidade Rq dos ensaios 10 ao 18 no torneamento
Fonte: Autoria própria.

C.6 RUGOSIDADE SUPERFICIAL Rz

Rugosidade Rz																	
N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão
1	1R1	16,684	15,055	14,7971	0,3648	4	4R1	13,4	10,9644	10,8889	1,3006	7	7R1	12,18	11,7226	15,6436	3,5785
		11,079						10,834						10,254			
		18,158						11,128						11,66			
		14,821						10,192						12,581			
		14,533						9,268						11,938			
	1R2	16,684	15,055				11,473	12,4426	20,471								
		11,079					12,42		17,041								
		18,158					12,566		22,873								
		14,821					13,465		20,863								
		14,533					12,289		20,627								
	1R3	14,863	14,2812				12,378	9,2596	13,811								
		14,139					8,834		15,062								
		14,638					8,563		17,045								
		14,205					6,998		14,217								
		13,561					9,525		14,031								
2	2R1	11,934	12,8208	10,4501	1,8218	5	5R1	8,083	9,0406	8,9123	0,4829	8	8R1	11,96	11,379	16,1031	4,4867
		14,271						8,373						11,287			
		12,061						9,528						12,335			
		13,721						9,213						11,857			
		12,117						10,006						9,456			
	2R2	6,9	8,391				8,112	8,2672	18,904								
		6,556					6,905		20,642								
		9,202					8,159		24,097								
		9,095					10,223		21,413								
		10,202					7,937		25,612								
	2R3	9,542	10,1386				8,958	9,429	14,025								
		8,939					9,796		14,685								
		11,29					10,574		14,765								
		10,571					7,56		16,831								
		10,351					10,257		13,678								
3	3R1	5,043	6,143	5,5581	0,4138	6	6R1	6,38	6,4712	6,6694	0,4010	9	9R1	9,879	8,1486	11,0775	2,3417
		6,246						7,419						8,167			
		6,596						6,083						8,522			
		6,106						6,06						6,702			
		6,724						6,414						7,473			
	3R2	4,886	5,2486				6,862	7,2286	10,313								
		4,940					8,033		11,969								
		5,502					7,44		11,075								
		5,38					6,67		10,523								
		5,535					7,138		12,138								
	3R3	5,29	5,2826				5,207	6,3084	15,294								
		5,494					6,062		13,139								
		4,992					6,594		13,764								
		5,32					7,997		12,843								
		5,317					5,682		14,362								

Quadro 21 - Rugosidade Rz dos ensaios 1 ao 9 no torneamento
Fonte: Autoria própria.

Rugosidade Rz																	
N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Medições (µm)	Média das medições nas Réplicas (µm)	Médias entre as Réplicas (µm)	Desvio Padrão
10	10R1	12,714	8,903	11,1621	1,6429	13	13R1	13,544	10,0222	12,6772	2,0169	16	16R1	10,633	10,2206	10,3229	0,8312
		11,407						8,936						8,242			
		6,214						8,314						9,326			
		5,508						11,435						12,659			
		8,672						7,882						10,243			
	10R2	10,829	11,8214				15,878	13,102	10,822								
		12,118					13,343		8,558								
		11,456					12,175		10,11								
		11,721					9,668		9,223								
		12,983					14,446		8,086								
	10R3	12,517	12,7618				15,137	14,9074	11,11								
		12,1					15,205		10,134								
		11,015					14,388		13,164								
		13,886					14,239		10,758								
		14,291					15,568		11,775								
11	11R1	8,88	8,203	11,1751	2,1090	14	14R1	13,33	14,4512	12,7411	1,9895	17	17R1	5,44	5,4066	5,3637	0,8997
		9,644						11,105						5,245			
		7,31						25,515						5,126			
		6,918						8,876						5,677			
		8,263						13,43						5,545			
	11R2	10,273	12,8782				18,083	13,821	6,484								
		13,432					12,774		5,639								
		13,381					13,684		6,775								
		13,494					10,554		6,442								
		13,811					14,01		6,878								
	11R3	13,502	12,444				12,356	9,9512	4,177								
		13,029					10,25		3,959								
		11,056					9,363		4,357								
		12,964					9,274		4,646								
		11,669					8,513		4,066								
12	12R1	7,993	9,3444	8,8729	2,5502	15	15R1	9,583	8,4288	9,2911	3,4168	18	18R1	6,018	6,5778	7,7943	0,8715
		9,746						6,576						6,714			
		9,486						7,048						6,794			
		10,069						7,788						6,335			
		9,428						11,149						7,028			
	12R2	5,14	5,5406				6,391	5,6048	7,747								
		4,981					5,487		7,861								
		5,153					5,169		8,108								
		6,675					5,341		8,64								
		5,754					5,636		8,8								
	12R3	11,318	11,7336				12,186	13,8398	9,011								
		12,311					15,719		10,015								
		12,001					14,369		7,468								
		12,329					13,454		8,113								
		11					13,471		8,262								

Quadro 22 - Rugosidade Rz dos ensaios 10 ao 18 no torneamento

Fonte: Autoria própria.

C.7 DESGASTE DE FLANCO DA FERRAMENTA DE CORTE

Desgaste de flanco da ferramenta de corte de tornear									
N° ensaio	Réplica	Média nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão	N° ensaio	Réplica	Média nas Réplicas (mm)	Médias entre as Réplicas (mm)	Desvio Padrão
1	1R1	0,003	0,0066	0,002551	10	10R1	0,003	0,0052	0,00172
	1R2	0,0086				10R2	0,0054		
	1R3	0,0082				10R3	0,0072		
2	2R1	0,0584	0,0368667	0,02001	11	11R1	0,052	0,0254	0,018873
	2R2	0,042				11R2	0,014		
	2R3	0,0102				11R3	0,0102		
3	3R1	0,0172	0,0096667	0,006124	12	12R1	0,003	0,004933333	0,002323
	3R2	0,0022				12R2	0,0082		
	3R3	0,0096				12R3	0,0036		
4	4R1	0,028	0,0136	0,010288	13	13R1	0,0022	0,001933333	0,000249
	4R2	0,0082				13R2	0,0016		
	4R3	0,0046				13R3	0,002		
5	5R1	0,0212	0,0350667	0,020179	14	14R1	0,0008	0,000933333	0,000189
	5R2	0,0636				14R2	0,0008		
	5R3	0,0204				14R3	0,0012		
6	6R1	0,0054	0,0036667	0,001473	15	15R1	0,0004	0,0012	0,000864
	6R2	0,0018				15R2	0,0008		
	6R3	0,0038				15R3	0,0024		
7	7R1	0,0734	0,0579333	0,023302	16	16R1	0,0416	0,0202	0,015169
	7R2	0,0754				16R2	0,0082		
	7R3	0,025				16R3	0,0108		
8	8R1	0,0606	0,0281333	0,022961	17	17R1	0,016	0,006466667	0,006753
	8R2	0,0114				17R2	0,0022		
	8R3	0,0124				17R3	0,0012		
9	9R1	0,0152	0,0099333	0,005008	18	18R1	0,0014	0,001066667	0,000249
	9R2	0,0032				18R2	0,001		
	9R3	0,0114				18R3	0,0008		

Quadro 23 - Desgaste de flanco da ferramenta de corte do torneamento
Fonte: Autoria própria.

Desgaste de flanco da ferramenta de corte do roscamento					
Nº ensaio	Nº réplica	Desg. Acumulado (mm)	Desg.em cada réplica (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão
1	RC1R1	0,829	0,829	0,2887	0,3823
	RC1R2	0,863	0,034		
	RC1R3	0,866	0,003		
2	RC2R1	0,678	0,678	0,2340	0,3140
	RC2R2	0,692	0,014		
	RC2R3	0,702	0,01		
3	RC3R1	0,212	0,212	0,1937	0,1333
	RC3R2	0,559	0,347		
	RC3R3	0,581	0,022		

Quadro 24 - Desgaste de flanco da ferramenta de corte do roscamento
Fonte: Autoria própria.