

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA FURAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 COM A APLICAÇÃO
EXTERNA DE NANOFLUIDOS EM QUANTIDADE REDUZIDA

por

Andressa Caroline da Silva Carvalho

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2018

ANÁLISE DA FURAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 COM A APLICAÇÃO
EXTERNA DE NANOFLUIDOS EM QUANTIDADE REDUZIDA

por

Andressa Caroline da Silva Carvalho
Engenheira Mecânica e Engenheira de Segurança do Trabalho

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Aprovada por:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben GonzalezPROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Dilson José Aguiar de SouzaUNISINOS

Prof. Dr. Flávio José Lorini PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 18 de maio de 2018

Aos meus pais, Irene e Rubens.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que ajudaram, direta e indiretamente, no caminho de mais uma etapa da minha vida culminando com o desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor orientador Dr. André João de Souza, pela disponibilidade, compreensão e dedicação.

Ao Laboratório de Usinagem, pelo fornecimento da infraestrutura, e ao técnico Guilherme Vargas Schirmer pelo auxílio técnico com a experimentação, conselhos e amizade.

Aos colegas da pós-graduação, Amália Mayrhofer, Daniela Fátima Giarollo, Fábio Telles, Guilherme Cortelini da Rosa, Matheus Polly e Rafael Farias Garcia, pela amizade, auxílio e risadas.

À UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), ao PROMEC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) e à CAPES (Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior), pelo suporte financeiro concedido durante mestrado.

Ao Professor Rogério Gelamo (Universidade Federal do Triângulo Mineiro) pela doação dos flocos de multicamadas de grafeno.

À empresa Walter Tools (Sr. Roberto Meelhuysen), pela doação das ferramentas utilizadas, e à empresa Quimatic®/Tapmatic®, pela doação do fluido de corte e do dispositivo nebulizador.

Aos laboratórios da UFRGS, LAPMA (Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados), LATRIB (Laboratório de Tribologia) e LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física), pela disponibilidade da infraestrutura e auxílio nas análises.

À minha família e amigos, que mesmo distantes fisicamente inspiram constante incentivo e valorização do conhecimento.

Ao meu marido, Leonardo Resende, pelo amor, companheirismo e apoio em todos os momentos.

A Deus, pela graça da vida e da fé.

RESUMO

A furação é um processo caracterizado por apresentar dificuldades em relação à formação e remoção do cavaco da região de corte, e à geração de altas temperaturas devido ao cisalhamento e encruamento do material no fundo do furo, principalmente, na usinagem do aço inoxidável austenítico. Com isso a presença do fluido de corte com boas propriedades de refrigeração e lubrificação faz-se necessária para preservar a vida da broca e garantir um acabamento satisfatório do furo. Contudo, com a tendência mundial de diminuição da quantidade de fluido de corte dispendido, tem-se buscado técnicas diferentes de aplicação que utilize o lubrificante em quantidades reduzidas. Associado a essas novas técnicas, vem sendo empregado cada vez mais o uso de partículas sólidas adicionadas ao fluido com o intuito de aumentar sua eficiência. Um tipo de partícula, que vem sendo aplicada em diversos setores produtivos devido a suas ótimas propriedades mecânicas, químicas e elétricas, é o grafeno. Sendo assim, pretende-se analisar o comportamento da furação do aço inoxidável austenítico AISI 304 utilizando flocos de multicamadas de grafeno dispersos em fluido de corte empregando o projeto de experimentos Box-Behnken. A aplicação do fluido é feita externamente utilizando a técnica de quantidade reduzida com três vazões: 1,5 l/h; 2,0 l/h e 2,5 l/h. O comportamento do processo é avaliado pelos esforços de corte (força de avanço e momento torsor), pela rugosidade (média e total), e pelos desvios (dimensional e de circularidade) na entrada e na saída do furo. O desempenho do grafeno é avaliado pela comparação dos resultados da sua utilização com os de outras duas condições de aplicação do fluido de corte sem adições: em quantidade reduzida e em abundância. Teve-se como resultado que todas as variáveis respostas analisadas sofreram alguma influência da velocidade de corte e/ou da vazão do fluido aplicado em quantidades reduzidas. Os benefícios da lubrificação e refrigeração do grafeno são sentidos em alguns resultados, como nos menores valores médios de rugosidade e de desvio dimensional. Mas, na análise do processo como um todo, não se afirma que o fluido de corte com flocos de multicamadas de grafeno aplicado externamente em quantidade reduzida traz mais benefícios que o sem adições.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenítico; flocos de multicamadas de grafeno; processo de furação; quantidade reduzida de fluido.

ABSTRACT

Drilling is a machining process characterized by difficulties in the formation and removal of the chip from the cutting region and the generation of high temperatures due to shearing and hardening of the material at the bottom of the hole, especially in the machining of austenitic stainless steel. Thus the presence of cutting fluid with good cooling and lubrication properties is necessary to preserve the drill life and ensure a satisfactory hole finish. However, with the worldwide trend of decreasing the amount of cutting fluid expended, different application systems have been sought which use the coolant in reduced amounts. Associated with these new techniques, the presence of solid particles added to the fluid has been increasingly used in order to enhance its efficiency. One of these particles, which have been applied in several productive sectors due to its excellent mechanical, chemical and electrical properties, is graphene. Therefore, it is intended to analyze the drilling behavior of AISI 304 austenitic stainless steel using multilayer graphene flakes dispersed in the cutting fluid using the Box-Behnken Design. The application of the fluid is done externally by means of reduced quantity lubricant with three flows: 1.5 l/h, 2.0 l/h and 2.5 l/h. The behavior of the process is evaluated via thrust force and torque, average and total roughness, and dimensional and circularity deviations at the input and output holes. The performance of graphene is evaluated by comparing the results of its use with two other cutting fluid conditions: quantity reduced and abundance. It was found that all the analyzed responses variables had some influence of the cutting speed and/or the flow of the applied fluid in reduced quantities. The benefits of graphene lubrication and cooling are felt in some results, such as the lower values of average roughness and dimensional deviation. However, in the analysis of the process as a whole, it is not possible to state that the multilayer graphene flakes cutting fluid externally applied brings more benefits than without additions.

Keywords: Austenitic stainless steel; multilayer graphene flakes; drilling process; reduced quantity lubricant.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Processo de furação	3
2.2	Variáveis independentes de entrada do processo de furação	3
2.2.1	Aços inoxidáveis austeníticos	3
2.2.2	Brocas helicoidais	6
2.2.3	Meios lubrificantes.....	7
2.2.4	Grafeno.....	10
2.3	Variáveis dependentes de saída do processo de furação	12
2.3.1	Avárias e desgastes das ferramentas de corte.....	13
2.3.2	Formação do cavaco.....	16
2.3.3	Temperatura na furação.....	17
2.3.4	Esforços de corte	19
2.3.5	Rugosidade da superfície usinada	20
2.3.6	Desvios dimensionais e geométricos do furo.....	23
2.4	Projeto de experimentos	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	Corpos de prova	28
3.2	Máquina-ferramenta e ferramenta de corte	29
3.3	Condições de lubrificação	31
3.4	Sistema de aquisição de sinais dos esforços de corte.....	31
3.5	Medição de rugosidades	33
3.6	Determinação dos desvios dimensional e de circularidade.....	34
3.7	Determinação das incertezas de medições das variáveis respostas.....	34
3.8	Planejamento experimental	35
3.9	Registros complementares.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Análise das variáveis respostas para a condição RQL	38
4.1.1	Esforços de corte	38

4.1.2	Rugosidade	43
4.1.3	Desvio dimensional	49
4.1.4	Desvio de circularidade	52
4.2	Análise das variáveis repostas para a condição RQL+MLG.....	56
4.2.1	Esforços de corte	56
4.2.2	Rugosidade	60
4.2.3	Desvio dimensional	64
4.2.4	Desvio de circularidade	68
4.3	Análise comparativa das variáveis respostas para as condições RQL, RQL+MLG e abundante	70
4.3.1	Esforços de corte	72
4.3.2	Rugosidade	74
4.3.3	Desvio dimensional	77
4.3.4	Desvio de circularidade	78
4.4	Otimização do processo	79
5	CONCLUSÕES	81
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	APÊNDICES	90
	APÊNDICE A – Valores médios das variáveis respostas para a condição RQL	90
	APÊNDICE B – Valores médios das variáveis respostas para a condição RQL+MLG	91
	APÊNDICE C – Valores médios das variáveis respostas para a condição abundante.....	92
	APÊNDICE D – Coeficientes da equação de regressão para as variáveis respostas	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Características de uma broca helicoidal.....	6
Figura 2.2 – Ângulos de saída e de folga em uma broca.....	7
Figura 2.3 – Classificação dos fluidos de corte.....	8
Figura 2.4 – Modelo simplificado de um nebulizador.	9
Figura 2.5 – Relação entre a qualidade e o preço para produção de grafeno.	11
Figura 2.6 – Tipos de desgaste presentes na broca após a execução de furos com as condições: (a) a seco, (b) criogênica e (c) abundante.....	15
Figura 2.7 – Mecanismo de formação do cavaco por corte ortogonal.	16
Figura 2.8 – Formação do cavaco na furação: (a) micrografias dos cavacos a diferentes distâncias do centro da broca; e, (b) fluxo natural dos cavacos.	17
Figura 2.9 – Distribuição de temperatura na ponta da broca após 12,7 mm de comprimento de corte com (a) $vc = 24,4$ m/min; (b) $vc = 48,8$ m/min.	19
Figura 2.10 – Esforços de corte durante a furação.	19
Figura 2.11 – Evolução da força de corte durante a furação: (a) início do furo, (b) zonas 2 e 3 no material e (c) toda a aresta de corte executando o furo.	20
Figura 2.12 – Representação gráfica da rugosidade: (a) média; (b) total.....	21
Figura 2.13 – Imagens da textura e perfis de rugosidade após a furação do aço ABNT P20. .	23
Figura 2.14 – Representação gráfica do projeto de Box-Behnken para três fatores.	26
Figura 3.1 – Dimensões do corpo de prova.....	28
Figura 3.2 – Centro de usinagem utilizado para a execução dos furos.	29
Figura 3.3 – Geometria e dimensões da ferramenta de corte utilizada no experimento.....	30
Figura 3.4 – Verificação do erro de batimento radial da broca com relógio comparador.....	30
Figura 3.5 – Condições de lubrificação: (a) sistema aspersor; (b) posição do bico.	32
Figura 3.6 – Fixação dos corpos de prova: (a) montagem do sistema; (b) base de fixação.	32
Figura 3.7 – Determinação dos valores médios dos esforços de corte: (a) área sombreada identificando a região; (b) ilustração do corte “em cheio”.....	33
Figura 3.8 – Medição dos parâmetros de rugosidade: (a) equipamento utilizado; (b) posição das medições.	34
Figura 3.9 – Medição dos desvios dimensional e de circularidade: (a) posicionamento do corpo de prova na MMC; (b) posições de leitura no furo.	35

Figura 4.1 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para: (a) Ff e (b) Mt	39
Figura 4.2 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL sobre: (a) Ff ; (b) Mt	40
Figura 4.3 – Cavacos obtidos na condição RQL: (a) Teste 7 ($vc = 65$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta, $q = 2,0$ l/h); (b) Teste 10 ($vc = 45$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta, $q = 1,5$ l/h).	41
Figura 4.4 – Aplicação externa do fluido de corte com a técnica RQL.	42
Figura 4.5 – Superfícies de resposta para Ff e Mt na condição RQL para: (a) $vc = 45$ m/min; (b) $q = 2,0$ l/h; e (c) $f = 0,11$ mm/volta.	42
Figura 4.6 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para: (a) Ra e (b) Rt	44
Figura 4.7 – Gráfico dos efeitos principais dos fatores na condição RQL sobre (a) Ra e (b) Rt	44
Figura 4.8 – Imagens da textura e perfis de rugosidade gerados na condição RQL: (a) Teste 1 ($q = 1,5$ l/h); (b) Teste 2 ($q = 2,5$ l/h).....	45
Figura 4.9 – Interação $vc \times q$ na condição RQL sobre: (a) Ra ; (b) Rt	46
Figura 4.10 – Imagens das texturas das paredes dos furos para os testes com $f = 0,11$ mm/volta na condição RQL.....	47
Figura 4.11 – Superfícies de resposta para Ra e Rt na condição RQL com: (a) $f = 0,11$ mm/volta; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $vc = 45$ m/min.	48
Figura 4.12 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para: (a) $d\phi e$; (b) $d\phi s$	50
Figura 4.13 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL para: (a) $d\phi e$; (b) $d\phi s$	50
Figura 4.14 – Superfícies de resposta para $d\phi e$ e $d\phi s$ na condição RQL com: (a) $f = 0,11$ mm/volta; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $vc = 45$ m/min.	51
Figura 4.15 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para: (a) dOe ; (b) dOs	53
Figura 4.16 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL sobre: (a) dOe ; (b) dOs	53
Figura 4.17 – Interações entre as variáveis de entrada sobre dOe na condição RQL: (a) $vc \times q$; (b) $f \times q$	54
Figura 4.18 – Superfícies de resposta para dOe e dOs na condição RQL com: (a) $f = 0,11$ mm/volta; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $vc = 45$ m/min.	55

Figura 4.19 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) Ff ; (b) Mt .	57
Figura 4.20 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre: (a) Ff ; (b) Mt .	58
Figura 4.21 – Interação $f \times q$ na condição RQL+MLG sobre Ff .	58
Figura 4.22 – Imagens da textura das paredes dos furos para os testes executados com $vc = 45$ m/min na condição RQL+MLG.	59
Figura 4.23 – Interações entre as variáveis de entrada sobre Mt na condição RQL+MLG: (a) $vc \times q$; (b) $f \times q$.	60
Figura 4.24 – Superfícies de resposta para Ff e Mt na condição RQL+MLG com: (a) $vc = 45$ m/min; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $f = 0,11$ mm/volta.	61
Figura 4.25 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) Ra ; (b) Rt .	62
Figura 4.26 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre Rt .	63
Figura 4.27 – Interações entre as variáveis de entrada sobre Rt na condição RQL+MLG: (a) $vc \times f$; (b) $vc \times q$.	63
Figura 4.28 – Superfícies de resposta para Rt na condição RQL+MLG com: (a) $vc = 45$ m/min; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $f = 0,11$ mm/volta.	64
Figura 4.29 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) $d\phi e$; (b) $d\phi s$.	65
Figura 4.30 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre $d\phi e$.	66
Figura 4.31 – Interação $vc \times q$ na condição RQL+MLG sobre $d\phi e$.	66
Figura 4.32 – Superfícies de resposta para $d\phi e$ e $d\phi s$ na condição RQL+MLG com: (a) $vc = 45$ m/min; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $f = 0,11$ mm/volta.	67
Figura 4.33 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) dOe ; (b) dOs .	69
Figura 4.34 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre: (a) dOe ; (b) dOs .	69
Figura 4.35 – Interação $f \times q$ na condição RQL+MLG sobre dOs .	70
Figura 4.36 – Superfícies de resposta para dOe e dOs na condição RQL+MLG com: (a) $vc = 45$ m/min; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $f = 0,11$ mm/volta.	71
Figura 4.37 – Comparação entre as Ff obtidas para todas as condições de lubrificarrefrigeração.	72

Figura 4.38 – Comparação entre os Mt gerados para todas as condições de lubrificação.	73
Figura 4.39 – Cavacos produzidos utilizando: (a) RQL; (b) RQL+MLG; (c) abundante.	73
Figura 4.40 – Imagens das brocas: (a) nova; desgastadas nas condições: (b) abundante, (c) RQL e (d) RQL+MLG.	74
Figura 4.41 – Comparação entre Ra medidos para todas as condições de lubrificação.	75
Figura 4.42 – Comparação entre Rt medidos para todas as condições de lubrificação.	75
Figura 4.43 – Imagens da textura dos furos obtidos com $vc = 45$ m/min, $f = 0,07$ mm/volta e $q = 2,5$ l/h (Teste 4) para as condições: (a) RQL, (b) RQL+MLG; (c) abundante.	76
Figura 4.44 – Comparação entre os $d\phi e$ medidos para todas as condições de lubrificação.	77
Figura 4.45 – Comparação entre os $d\phi s$ medidos para todas as condições de lubrificação.	77
Figura 4.46 – Comparação entre os dOe medidos para todas as condições de lubrificação.	78
Figura 4.47 – Comparação entre os dOs medidos para todas as condições de lubrificação.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos aços inoxidáveis.....	4
Tabela 2.2 – Propriedades do grafeno obtido por diferentes métodos.	11
Tabela 3.1 – Composição química do AISI 304 (% em massa).....	29
Tabela 3.2 – Fatores e seus níveis selecionados para o projeto de experimento.....	35
Tabela 3.3 – Matriz de experimentos Box-Behnken para as condições RQL e RQL+MLG...	36
Tabela 3.4 – Matriz de experimentos para a condição abundante.....	37
Tabela 4.1 – ANOVA dos esforços de corte na condição RQL.....	39
Tabela 4.2 – ANOVA dos parâmetros de rugosidade na condição RQL.....	43
Tabela 4.3 – ANOVA do desvio dimensional na condição RQL.....	49
Tabela 4.4 – ANOVA do desvio de circularidade na condição RQL.....	52
Tabela 4.5 – ANOVA dos esforços de corte na condição RQL+MLG.....	56
Tabela 4.6 – ANOVA dos parâmetros de rugosidade na condição RQL+MLG.....	62
Tabela 4.7 – ANOVA do desvio dimensional na condição RQL+MLG.	65
Tabela 4.8 – ANOVA do desvio de circularidade na condição RQL+MLG.	68
Tabela 4.9 – Valores médios de Ff e Mt para todas as condições lubrificantes.	72
Tabela 4.10 – Valores médios de rugosidade para todas as condições lubrificantes.	75
Tabela 4.11 – Valores médios de $d\phi$ para todas as condições lubrificantes.....	78
Tabela 4.12 – Valores médios do desvio de circularidade para todas as condições lubrificantes.	78
Tabela 4.13 – Comparativo dos valores otimizados de todas as variáveis respostas para as condições RQL, RQL+MLG e abundante.....	80
Tabela A.1 – Valores médios das variáveis resposta para a condição RQL	95
Tabela B.1 – Valores médios das variáveis respostas para a condição RQL+MLG.....	96
Tabela C.1 – Valores médios das variáveis respostas para a condição abundante.....	97
Tabela D.1 – Coeficientes da equação de regressão para as variáveis respostas obtidas com a condição RQL	98
Tabela D.2 – Coeficientes da equação de regressão para as variáveis respostas obtidas com a condição RQL+MLG.....	98

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	Análise de variância
APC	Aresta postiça de corte
BBD	Box-Behnken <i>Design</i>
CCD	Projeto composto central (<i>Composite central design</i>)
CVD	Deposição química de vapor
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Tolerância-padrão
LAPMA	Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LATRIB	Laboratório de Tribologia
LAUS	Laboratório de Automação em Usinagem
MLG	Multicamadas de grafeno (<i>Multilayer graphene</i>)
MQL	Mínima quantidade de lubrificante (<i>Minimal quantity lubrication</i>)
MSR	Metodologia de superfície de resposta
NBR	Norma Brasileira
NDM	Usinagem quase a seco (<i>Near dry machining</i>)
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
QM	Quadrado médio
RQL	Quantidade reduzida de lubrificante (<i>Reduced quantity lubrication</i>)
SiC	Carbeto de silício
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m ²
b_{ij}	Coefficientes da equação de regressão
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
C_o	Quantidade de pontos centrais
$d\phi$	Desvio dimensional, μm
$d\phi_e$	Desvio dimensional na entrada do furo, μm
$d\phi_s$	Desvio dimensional na saída do furo, μm
dO	Desvio de circularidade, μm
dO_e	Desvio de circularidade na entrada do furo, μm
dO_s	Desvio de circularidade na saída do furo, μm
f	Avanço, mm/volta
Fe	Ferro
F_{aa}	Parcela da força de avanço nas arestas principais da broca, N
F_{ap}	Força de corte nas arestas principais da broca, N
F_{at}	Parcela da força de avanço na aresta transversal da broca, N
F_{bp}	Parcela da força de avanço nas guias da broca, N
F_{cs}	Parcela da força de avanço na superfície de saída da broca, N
F_f	Força de avanço, N
h	Espessura de corte, mm
\bar{I}	Média dos valores medidos da variável resposta
I_k	K-ésimo valor medido da variável resposta
k	Número de fatores
l_n	Comprimento de avaliação, mm
l_r	Comprimento de amostragem, mm
Mn	Manganês

Mo	Molibdênio
M_t	Momento tursor, N.m
n	Número de medições repetidas efetuadas para cada variável resposta
N	Número de experimentos requeridos
Ni	Níquel
P	Fósforo
q	Vazão, l/h
r	Distância do centro da broca em que se aplica a força de corte, m
R_a	Rugosidade média (desvio aritmético médio), μm
R_t	Rugosidade total, μm
R^2	Coefficiente de determinação
S	Enxofre
Si	Silício
T_{at}	Parcela do momento tursor na aresta transversal da broca, N.m
T_{bp}	Parcela do momento tursor nas guias da broca, N.m
T_{cs}	Parcela do momento tursor na superfície de saída da broca, N.m
t	Coefficiente de Student
t_1	Tempo inicial do corte “em cheio”, s
t_2	Tempo final do corte “em cheio”, s
U	Incerteza expandida
$u(I)$	Incerteza-padrão dos valores medidos da variável resposta
v	Graus de liberdade
v_c	Velocidade de corte, m/min
x_i	Fatores controláveis
Y	Variável resposta
σ	Ângulo da ponta da broca, $^\circ$
α	Ângulo de folga da broca, $^\circ$
γ	Ângulo de hélice da broca, $^\circ$
α_f	Ângulo de folga sob perspectiva do plano de trabalho da broca, $^\circ$
γ_f	Ângulo de hélice sob perspectiva do plano de trabalho da broca, $^\circ$

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de usinagem, a furação se apresenta como um dos mais empregados na indústria metal-mecânica, de modo que seu estudo é fundamental [Diniz et al., 2013]. Por ser um processo enclausurado, onde o corte ocorre no fundo do furo, há a necessidade de se conhecer a influência dos parâmetros envolvidos, para que se alcance a formação e a extração facilitada dos cavacos, e a remoção adequada do calor gerado com o cisalhamento e com o encruamento do material nessa região [Camargo, 2008].

Não só a furação, mas a usinagem do aço inoxidável de maneira geral apresenta certa dificuldade. Altas forças de corte, elevadas temperaturas, presença de encruamento e formação de aresta postiça tornam as ferramentas utilizadas na usinagem desse material mais propensa a desgastes, e trazem um acabamento ruim à superfície usinada [Trent e Wright, 2000; Dolinsek, 2003; Pradeep e Shakel, 2017]. O aço inoxidável austenítico possui baixa condutividade térmica que, somada a altas temperaturas do corte, fazem com que a maior parte do calor gerado seja direcionada à ferramenta, acelerando o seu desgaste [Camargo, 2008].

Para prolongar a vida da ferramenta, a maneira mais eficaz encontrada está na redução da temperatura de corte [Pradeep e Shakel, 2017]. Essa redução está associada à utilização de fluidos de corte que devem proporcionar resfriamento e lubrificação, de modo a reduzir a severidade do contato presente nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco. Na furação, o fluido de corte também auxilia na remoção do cavaco, principalmente em furos profundos, onde o cavaco formado apresenta dificuldades em escoar [Diniz et al., 2013]. Mas atualmente, seja pelo custo ou pelo prejuízo à saúde e ao meio ambiente, muitos têm sido os esforços para se utilizar menos ou nenhum fluido de corte nos processos de usinagem [Astakhov, 2006].

O uso de menores quantidades de fluidos lubrificantes já tem sido evidenciado, em vários estudos ao longo dos anos, como uma alternativa viável em relação à furação abundante, além de apresentar, em muitos casos, melhor desempenho quando comparado à furação a seco [Sharma et al., 2016]. Técnicas de aplicação para a nebulização do fluido na zona de corte têm sido desenvolvidas com o auxílio de ar (gás) comprimido. Essa mistura gás-fluido funciona com maior capacidade de lubrificação que refrigeração na interface da peça trabalhada [Diniz et al., 2013; Sharma et al., 2016].

Em busca de melhorias nos lubrificantes, pesquisas recentes mostram a adição de partículas e nanopartículas sólidas dispersas em fluidos de corte associados à aplicação em menores quantidades. Isso ocorre basicamente no sentido de aumentar a eficiência refrigerante

do fluido-base, aumentando a condutividade térmica e a capacidade de transferência de calor por convecção [Mello, 2015]. Dentre as várias partículas sólidas, o grafeno tem se destacado devido a sua alta condutividade elétrica, térmica e resistência mecânica sendo utilizado em alguns processos de usinagem [Zarbin e Oliveira, 2013].

Considerando todos esses aspectos, o objetivo deste estudo está em contribuir com as pesquisas desta área, analisando o comportamento da furação do aço inoxidável AISI 304 utilizando flocos de multicamadas de grafeno dispersos em fluido de corte, aplicado externamente em quantidade reduzida (vazão entre 1,5 e 2,5 l/h). O comportamento do processo é avaliado pelos esforços de corte necessários para a execução do furo e pelo acabamento da superfície usinada através da medição da rugosidade e dos desvios dimensional e de circularidade. O desempenho da adição do grafeno é avaliado pela comparação dos resultados adquiridos com a sua utilização, com os resultados de outras duas condições: fluido de corte aplicado em quantidade reduzida e em abundância.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão sobre os temas relevantes ao desenvolvimento do trabalho está apresentada a seguir. São abordados conhecimentos relativos à furação de aços inoxidáveis austeníticos, à utilização de nanofluido como meio lubrificante e ao acabamento do furo usinado.

2.1 Processo de furação

A furação pode ser definida como um processo mecânico de usinagem cujo propósito é a obtenção de um furo geralmente cilíndrico em uma peça, utilizando ferramenta multicortante, normalmente a broca helicoidal, que ocorre através dos movimentos de avanço e de corte executados pela ferramenta ou pela peça a ser furada [Ferraresi, 1970; Tschätsch, 2009]. Dentre os processos de fabricação por usinagem, a furação é muito utilizada na indústria por ser necessária na produção de diferentes peças, sendo caracterizada como uma das operações de execução mais demoradas, quando comparada ao torneamento e fresamento [Astakhov, 2010a; Diniz et al., 2013].

A furação possui várias características próprias que fazem da mesma um processo singular e que devem ser consideradas no seu estudo e durante a sua execução; por exemplo, a dificuldade de remoção do cavaco gerado e o acesso do fluido lubrificante à zona de corte em furos mais profundos (comprimento do furo cinco vezes maior que o seu diâmetro) [Stephenson et al., 2006]. Outra peculiaridade do processo está relacionada à variação da velocidade nas arestas principais, de um valor máximo na periferia da broca a próximo de zero na aresta transversal, dificultando o corte no centro do furo devido à grande deformação plástica no local, causando recalque e encruamento em materiais dúcteis. [Trent e Wright, 2000; Diniz et al., 2013]

2.2 Variáveis independentes de entrada do processo de furação

São apresentados neste item aspectos importantes relacionados às variáveis controladas em um processo de furação. Essas variáveis envolvem, basicamente, o material usinado, a ferramenta selecionada e o meio lubrificante aplicado.

2.2.1 Aços inoxidáveis austeníticos

Designam-se como aços inoxidáveis os aços que possuem teores de cromo superiores a 12%. A adição deste elemento propicia aos aços inoxidáveis a grande resistência à oxidação e

à corrosão através da formação de um filme de óxido rico em cromo, invisível e aderente, na superfície do material [ASM, 1990; Silva e Mei, 2010]. Esses aços também são de grande importância para a engenharia, pelas suas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e tenacidade, no caso dos inoxidáveis austeníticos [Silva e Mei, 2010].

Os aços inoxidáveis são classificados geralmente com base em sua microestrutura a temperatura ambiente, já que a mesma tem efeito dominante sobre as propriedades. Para esclarecimentos a respeito de classificação e discussão de suas propriedades, esses aços são agrupados em cinco categorias que estão apresentadas na Tabela 2.1, de acordo com Santos e Sales, 2007, e, Silva e Mei, 2010.

Tabela 2.1 – Classificação dos aços inoxidáveis.

Categorias	Características	Especificações
Martensíticos	Ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono acima de 0,1% (em geral), garantindo sua temperabilidade.	AISI: 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, B e C, 501.
Ferríticos	Ligas de ferro e cromo (15-20%) essencialmente ferríticas a todas as temperaturas. Menores teores de carbono em relação aços martensíticos.	AISI: 405, 430, 430F, 446, 502.
Austeníticos	Ligas de ferro, cromo (16-30%) e níquel (8-35%), com um máximo de 0,08% de carbono, sendo predominantemente austeníticas após tratamento térmico comercial.	AISI: 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347.
Ferrítico-austeníticos (duplex)	Ligas de ferro, cromo (18-27%), níquel (4-7%), molibdênio (1-4%) e outros elementos, especialmente nitrogênio.	AISI 329, UNS S32304, S31803.
Endurecidos por precipitação	Ligas de ferro, cromo (12-17%), níquel (4-8%), molibdênio (0-2%) e outros elementos como alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio que permitam precipitação de compostos intermetálicos	15-5, 17-4, 17-7, 13-8 Mo.

Dentre todos os aços inoxidáveis, os austeníticos são os mais empregados, possuindo maior resistência à corrosão. Sua elevada capacidade de deformação está associada à estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) [Callister Jr., 2008; Smith e Hashemi, 2012]. A estabilidade da estrutura austenítica na temperatura ambiente ocorre pela adição de níquel, o que aumenta a ductilidade, a resistência ao impacto e a corrosão do material [Smith e Hashemi, 2012]. O aço inoxidável austenítico responde muito bem ao trabalhado a frio, devido a sua alta plasticidade e grande capacidade de encruamento, permitindo a conformação de peças de geometria complexa [Silva e Mei, 2010].

Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados, em comparação aos ferríticos e martensíticos, como os que apresentam maior dificuldade de usinagem [Santos e Sales, 2007].

Segundo Trent e Wright, 2000, Santos e Sales, 2007, e Diniz et al., 2013, existem várias características que promovem essa dificuldade, sendo descritas nos itens que se seguem:

- baixa condutividade térmica, que leva a uma grande concentração do calor na zona de corte, causando o desgaste da ferramenta;
- formação de cavacos longos, que podem enrolar na ferramenta e prejudicar o acabamento da superfície usinada;
- alto coeficiente de atrito, que aumenta o esforço necessário para a formação do cavaco e, conseqüentemente, a geração de temperatura;
- cavacos com tendência a empastar sobre a superfície de saída ferramenta, formando grandes arestas postizas de corte (APC);
- alto coeficiente de dilatação térmica, dificultando o alcance de tolerâncias mínimas;
- endurecimento das superfícies usinadas devido à deformação plástica (encruamento mecânico), sendo muito prejudicial quando da utilização de pequenos avanços;
- tendência de endurecimento a temperaturas elevadas (acima de 700°), devido à presença do níquel e do cromo, e levando à ocorrência de desgaste de cratera por difusão.

Alguns trabalhos relacionados com a usinagem de aços inoxidáveis abordam essas características na furação desses materiais. Rios, 2002, estudou o comportamento do fluido sintético aplicado internamente pela broca na furação do AISI 304, constatando que o mesmo forneceu maior refrigeração ao sistema de corte em comparação ao fluido mineral. O autor verificou menor desgaste na superfície de saída e na aresta principal da ferramenta, e também, menores alterações nas variáveis geométricas do furo (circularidade, cilíndricidade e diâmetro) que poderiam ser causadas pelo superaquecimento gerado durante o corte.

Dolinsek, 2003, pesquisou o encruamento mecânico na furação de aço inoxidável austenítico AISI 321 e verificou que a velocidade de corte não tem contribuição significativa com o encruamento que ocorre no fundo do furo, mas o avanço sim. O autor concluiu que, ao furar aço inoxidável austenítico, deve-se escolher um avanço maior que a profundidade da camada que foi endurecida abaixo da aresta, para reduzir a resistência ao cisalhamento do material, e diminuir o desgaste de flanco da broca.

Sultan et al., 2015b, ao analisarem a formação do cavaco na furação do AISI 316L com broca de metal-duro, observaram o avanço como o parâmetro de corte de maior influência. Para o maior valor empregado deste, eram produzidos cavacos longos em formato de fita, com tendência a enrolar na broca, prejudicando o processo. Ademais, provoca um severo desgaste nas arestas da mesma.

Vas et al., 2016, verificaram a influência dos parâmetros de corte na mudança de temperatura ao furar AISI 304 com broca de aço-rápido. Constataram que o aumento, tanto do avanço quanto da velocidade de corte, gerou acréscimos na temperatura durante a furação, resultando em severa formação de cavacos que acumularam em grande quantidade na interface ferramenta-cavaco, principalmente na ausência de aplicação do fluido lubrificante-refrigerante.

2.2.2 Brocas helicoidais

As brocas helicoidais são utilizadas nos mais variados níveis de sistemas de fabricação, e esta grande quantidade de aplicações acaba por possibilitar uma ampla variedade de ferramentas de corte [Astakhov, 2010a]. De um modo geral, as características construtivas de uma broca helicoidal são comuns à maioria das ferramentas utilizadas na furação, servindo de base para o entendimento daquelas que possuem geometrias mais específicas. Segundo Astakhov, 2010a, são elas:

- haste, responsável pela fixação da broca na máquina-ferramenta;
- rebaixo (opcional);
- parte cortante, composta pelos canais helicoidais, ponta da broca, e as arestas principais e transversal de corte. A Figura 2.1, adaptada de Astakhov, 2010a, mostra as principais características de uma broca helicoidal.

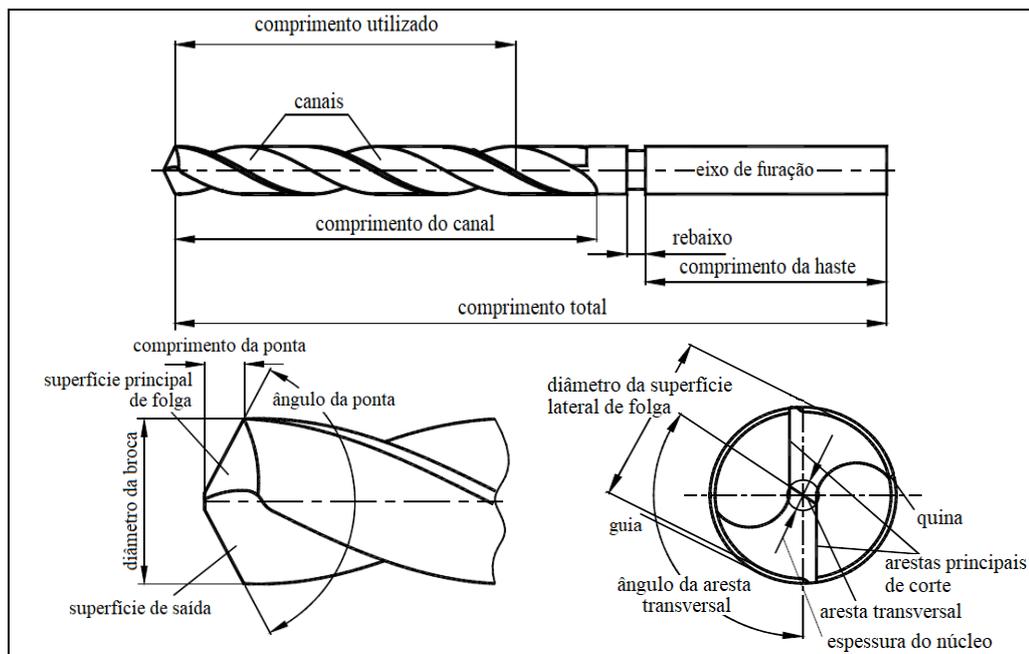


Figura 2.1 – Características de uma broca helicoidal.

Com relação à geometria das brocas helicoidais, destacam-se os ângulos de ponta (σ), de folga (α) e de hélice (γ), apresentados na Figura 2.2, adaptada de Capello et al., 2008. O ângulo de folga afeta o desempenho da ferramenta ao aumentar ou diminuir o atrito gerado pelo contato entre a superfície de folga e a peça usinada, enquanto o ângulo de hélice dita a forma como o cavaco será formado e extraído da região de corte [Astakhov e Davim, 2008]. Os ângulos α_f e γ_f são os ângulos efetivos de folga e de hélice no plano de trabalho da ferramenta.

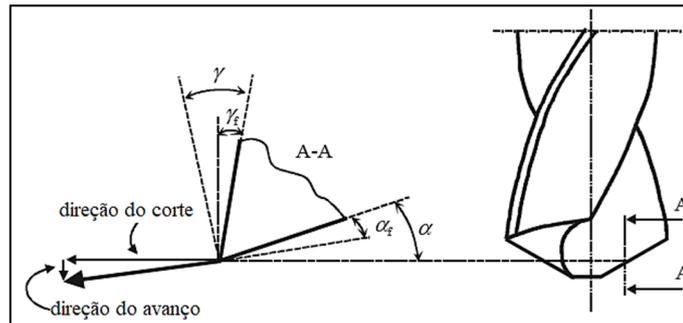


Figura 2.2 – Ângulos de saída e de folga em uma broca.

A broca helicoidal produzida em metal-duro tem recebido muitos avanços nos últimos anos. Estas ferramentas apresentam elevado desempenho, possuem maior rigidez e permitem altas rotações pela máquina-ferramenta, quando comparada à ferramenta de aço rápido. Com isso, se obtêm furos mais precisos, com menores valores de tolerância (melhor acabamento), e sem a necessidade da utilização de pré-furo [Rios, 2002; Tschätsch, 2009; Diniz et al., 2013].

2.2.3 Meios lubrificantes

Cada vez mais na indústria, a necessidade de baixos custos e alta produtividade tem exigido dos processos de usinagem maior capacidade de corte e precisão dimensional, e menores gastos com ferramenta [Debnath et al., 2014]. Por isso, o uso de fluidos de corte, quando selecionados e aplicados corretamente fornecem benefícios ao processo. As funções básicas de um fluido corte no processo de usinagem são fornecer refrigeração e lubrificação, reduzindo a severidade dos contatos nas interfaces ferramenta-peça usinada e ferramenta-cavaco, ao alterar as condições tribológicas presentes [Astakhov, 2008]. Na furação especificamente, o fluido de corte também possui um desempenho muito importante, o de auxiliar na remoção do cavaco formado para fora do furo [Diniz et al., 2013]. Conseqüentemente, durante o corte, os fluidos contribuem com: a diminuição do desgaste da ferramenta, fornecendo maior vida útil; a produção de peças mais precisas, ao diminuir a expansão térmica causada pelo excesso de calor gerado; o alcance de melhor qualidade da

superfície (acabamento e integridade); e, a redução do estresse térmico na máquina-ferramenta, entre outras possibilidades [Tschätsch, 2009].

Os fluidos de corte podem ser classificados conforme Diniz et al., 2013, basicamente em dois tipos, aqueles que são miscíveis em água e os que não são (óleo integral), como apresentado na Figura 2.3. Entre os miscíveis têm-se, as emulsões de óleo em água com alto poder refrigerante, e as soluções químicas (fluidos sintéticos) que são de uso geral, fornecendo boas propriedades lubrificantes. Os óleos integrais, minerais e vegetais, são preferidos em situações de desbaste pesado, devido à excelente lubrificação.

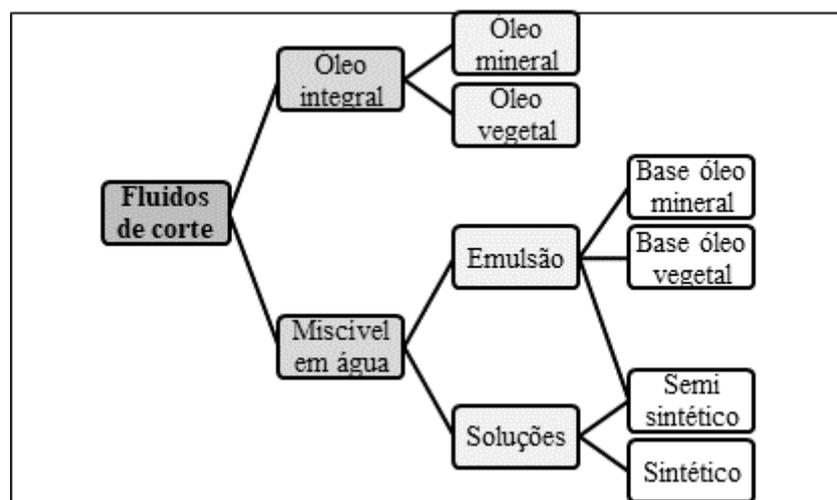


Figura 2.3 – Classificação dos fluidos de corte.

Na furação, o fluido de corte deve possuir grande capacidade de lubrificação e ter baixa viscosidade para auxiliar na remoção do cavaco [Diniz et al., 2013]. Como a peça e a ferramenta estão sempre em contato dificultando o acesso do fluido, pode ser utilizado sempre que possível, broca com canais internos para aplicação do fluido, principalmente na furação profunda [Machado et al., 2015].

Apesar dos benefícios dos fluidos de corte, aspectos ambientais e de saúde tem levado pesquisadores e empresas a buscarem desenvolver e aplicar fluidos biodegradáveis, e a encontrarem técnicas que possam auxiliar em relação à quantidade de fluido dispendido durante o processo. Nesse contexto, a completa ausência do fluido é a primeira técnica que pode ser empregada, com suas vantagens e desvantagens, seguidas por técnicas baseadas em quantidades muito pequenas de fluido, e que são aplicadas diretamente à zona de corte [Tschätsch, 2009].

São encontradas diversas referências que classificam o modo de aplicação do fluido de corte de acordo com a quantidade. Para Tschätsch, 2009, a usinagem abundante ocorre acima de 600 l/h, já a quantidade mínima de lubrificação (*minimum quantity lubrication* – MQL)

acontece de 0,05 l/h a 1,0 l/h. Para a Federação Alemã de Instituições para Seguridade e Prevenção de Acidentes, de acordo com sua normativa BGI/GUV-I 718-E, 2010, a técnica MQL ocorre em média com vazão de até 0,05 l/h, podendo ser aplicado cerca de 0,15 l/h em casos especiais e durante pouco tempo. Ainda segundo a normativa, a utilização de vazão de fluido de corte de até 2,0 l/h é classificada como quantidade reduzida de lubrificação (*reduced quantity lubrication* - RQL). Para Souza et al., 2016, a aplicação em RQL, engloba vazões de 1,0 a 10 l/h, podendo ainda especificar para a técnica MQL vazões entre 0,05 e 0,5 l/h e, ainda, a usinagem quase a seco (*near dry machining* - NDM) para vazões abaixo de 0,05 l/h. O que se percebe é que entre as diferentes referências, as vazões utilizadas em quantidades mínima e reduzida estão, cada uma, em faixas muito próximas.

Independente da denominação dada, a aplicação das técnicas RQL, MQL, ou NDM ocorre por pulverização (nebulização) da mistura do fluido de corte com gás (normalmente ar comprimido) sob pressão na zona de corte [Tschätsch, 2009; Souza et al., 2016]. O equipamento responsável pela nebulização é explicado e apresentado de maneira simplificada por Astakhov, 2008 (Figura 2.4). O nebulizador utiliza a energia do gás comprimido para atomizar o óleo (fluido de corte) em partículas de tamanho micrométrico (gotículas), através do efeito Venturi, e pulverizá-lo na região de corte. A posição do bico difusor deve ser controlada pelo operador da máquina onde o sistema de nebulização está instalado, de modo que, os parâmetros do aerossol (distância e ângulo de aplicação) podem ser alterados dependendo das condições e do processo de usinagem.

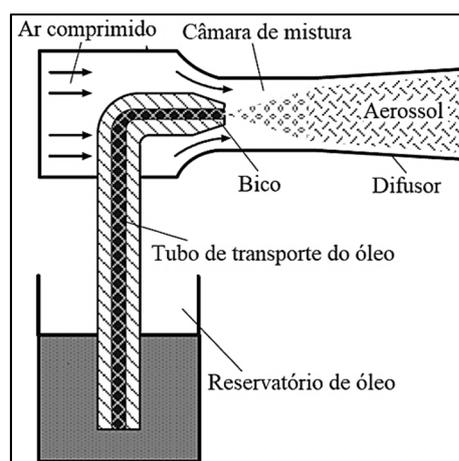


Figura 2.4 – Modelo simplificado de um nebulizador.

Rahim e Dorairaju, 2018, afirmam que, ao atomizar o fluido de corte, a tendência é que as gotículas nebulizadas penetrem de maneira facilitada na zona de corte, refrigerando-a. A pressão do gás comprimido também pode auxiliar na refrigeração, sendo que, a alta velocidade

com que as gotículas atingem a região de corte faz com que elas absorvam o calor gerado e evaporem rapidamente.

2.2.4 Grafeno

O grafeno é o primeiro cristal atômico bidimensional desenvolvido de modo sintético que vem recebendo um interesse crescente da academia e da indústria desde a sua descoberta [Novoselov et al., 2012; Zhong et al., 2017]. Um cristal atômico de grafeno é formado por átomos de carbono dispostos em uma estrutura hexagonal, ou seja, o grafeno nada mais é que a unidade básica e fundamental que forma as estruturas do grafite, das fibras e nanotubos de carbono [Fonseca, 2011; Novoselov, 2011]. Toda a atenção dada a esse material se deve as suas excelentes propriedades que lhe confere multifuncionalidade: condutividade térmica de cerca de 5000 W/m.K [Balandin et al., 2008]; módulo de elasticidade 1000 GPa e tensão de resistência máxima 130 GPa [Lee et al., 2008]; além de ser impermeável a qualquer gás, e de suportar densidades extremamente altas de corrente elétrica [Novoselov et al., 2012].

A obtenção do grafeno ocorre por diferentes métodos, podendo ser classificado de acordo com sua utilização ou pelo ambiente em que é sintetizado. Os principais métodos ditos por Novoselov et al., 2012, e Zhong et al., 2017, estão citados a seguir.

- esfoliação mecânica: utilizando fita adesiva se esfolia o grafite, produzindo grafeno.
- esfoliação química (esfoliação em fase líquida): baseia-se na exposição do material a um solvente normalmente não aquoso, submetido à ação ultrassônica, em que o grafite se divide em plaquetas individuais produzindo uma quantidade significativa de flocos monocamadas na suspensão.
- esfoliação química via óxido de grafeno: neste método o grafite é primeiro oxidado e depois esfoliado por ultrassom em solução aquosa.
- CVD: filmes de grafeno policristalino com grandes áreas são formados por deposição química de vapor (CVD) em folhas de cobre.
- SiC: o grafeno também pode ser epitaxialmente crescido em SiC (carbeto de silício) monocristalino deixando assim uma superfície grafitizada.

Deve-se destacar que as propriedades e aplicações de um tipo específico de grafeno dependem grandemente do seu método produtivo. Novoselov et al., 2012, apresenta na Figura 2.5 uma relação entre a qualidade do grafeno produzido por diferentes métodos e o preço para a produção em grandes quantidades. Na Tabela 2.2 o autor caracteriza o tamanho do cristal e da amostra obtidos, e apresenta um resumo das suas aplicações.



Figura 2.5 – Relação entre a qualidade e o preço para produção de grafeno.

Tabela 2.2 – Propriedades do grafeno obtido por diferentes métodos.

Método	Tamanho do cristal (μm)	Tamanho da amostra (mm)	Aplicações
Esfoliação mecânica	>1000	>1	Pesquisa
Esfoliação química (em fase líquida)	$\leq 0,1$	Flocos de infinitas camadas sobrepostas	Revestimentos, tintas e camadas condutoras, compósitos, armazenamento de energia, bioaplicações.
Esfoliação química via óxido de grafeno	~ 100	Flocos de infinitas camadas sobrepostas	Revestimentos, tintas e camadas condutoras, compósitos, armazenamento de energia, bioaplicações.
CVD	1000	~ 100	Nanoeletrônica, camadas condutoras transparentes, sensores, bioaplicações.
SiC	50	100	Transistores de alta frequência e outros dispositivos eletrônicos.

Através do método de esfoliação química se obtém grafeno na forma de flocos com várias camadas sobrepostas de material. Rouxinol et al., 2010, esclarecem que as propriedades dessas camadas dependem da quantidade empilhada. Por exemplo, a condutividade térmica do grafeno de única camada é duas vezes maior que a do grafite, mas, quando o grafeno é formado por quatro camadas, sua condutividade se iguala a do grafite. No entanto, multicamadas de grafeno (*multilayer graphene* – MLG) que são formadas por cinco camadas no mínimo, possuem algumas vantagens em relação às menores quantidades de camadas, como estabilidade mecânica e química melhorada, além de ser fabricado e processado mais facilmente, podendo ser produzido em larga escala.

Estudos recentes têm averiguado a aplicação do grafeno nas mais diversas áreas. Podem ser encontradas pesquisas sobre a avaliação de sua biocompatibilidade [Lasocka et al., 2018;

Li et al., 2018]; sobre a sua presença em dispositivos fotovoltaicos [Mahmoudi et al., 2018], em sensores e biosensores [Justino et al., 2017; Nag et al., 2017], em baterias e supercapacitores [Ye et al., 2018], e, em reforço de materiais compósitos [Hu et al., 2017].

Na usinagem, tem aumentado o número de estudos que combinam fluidos com partículas sólidas, a maioria em tamanho nanométrico (nanofluidos), sendo aplicados com sistemas que utilizam mínima quantidade de lubrificante (MQL) como alternativa aos sistemas de lubrificação comuns [Benedicto et al., 2017]. Muitos desses estudos se utilizam de grafeno na forma de nanopartículas.

Dentre alguns exemplos de aplicação do grafeno produzido pelos diferentes métodos, nos processos de usinagem, Silva et al., 2015, analisaram a retificação de aço para molde utilizando flocos de MLG dispersos em fluido de corte de base vegetal, sendo verificados menores valores de microdureza subsuperficial nas peças usinadas com grafeno. Os autores acreditam que a presença dos flocos de MLG melhorou a eficiência do fluido em relação ao resfriamento e a lubrificação, afetando menos a integridade da superfície da peça.

Uysal, 2016, investigou o desgaste da ferramenta no fresamento de aço inoxidável ferrítico utilizando fluido de corte vegetal com adição de grafeno aplicado em mínima quantidade. O autor afirma que foram os efeitos de lubrificação e refrigeração das nanopartículas que reduziram consideravelmente o desgaste do flanco, apresentando valores inferiores quando comparado ao resultado obtido a seco e com fluido puro.

Yi et al., 2017, utilizaram óxido de grafeno suspenso no fluido de corte para a furação da liga Ti-6Al-4V. Eles encontraram uma significativa redução nos esforços de corte e grande melhora na rugosidade, em comparação com os resultados obtidos com o método convencional. Os autores também destacaram o aumento da lubrificação do fluido e da sua condutividade térmica com a adição do grafeno, de modo que acreditam que as partículas alcançaram a zona de corte, melhorando a lubrificação entre a ferramenta e a peça, e diminuindo o atrito.

2.3 Variáveis dependentes de saída do processo de furação

Neste item estão apresentadas as variáveis influenciadas pelos parâmetros de entrada, sob a perspectiva do processo de furação, respectivamente: avarias e desgaste da ferramenta, formação do cavaco, temperatura na usinagem, esforços de corte e acabamento da superfície usinada (rugosidade, desvios dimensional e geométrico).

2.3.1 Avarias e desgastes das ferramentas de corte

Com o uso contínuo, é natural que o formato da aresta de corte mude até que a ferramenta deixe de apresentar eficiência no processo de formação do cavaco, pois o desgaste possui grande influência sobre a qualidade do produto final em relação à precisão dimensional e à integridade da superfície usinada [Trent e Wright, 2000; Attanasio et al., 2017]. Portanto, a compreensão do mecanismo pelo qual ocorre o desgaste da ferramenta é de suma importância, permitindo ações preventivas que objetivem o prolongamento da vida útil da aresta de corte [Machado et al., 2015].

Vários fenômenos levam à inutilização da aresta de corte, sendo chamada de desgaste, quando a ferramenta sofre mudança em sua geometria por perda de massa contínua e de avaria, quando a perda de massa acontece repentinamente (quebra, lascamento e trinca) [Machado et al., 2015]. A seguir são apresentados os tipos de desgaste e avarias comuns aos processos de usinagem de acordo com os autores Trent e Wright, 2000, Diniz et al., 2013, Machado et al., 2015, e Sandvik Coromant, 2018.

- Desgaste de flanco: ocorre do contato entre a peça e a ferramenta estando situado na superfície de folga desta. Sua presença na aresta principal de uma broca pode indicar grande batimento radial, velocidade de corte muito alta, avanço muito baixo e quantidade insuficiente de fluido de corte. Já na aresta transversal de corte pode indicar velocidade de corte muito baixa e avanço muito alto. A presença deste desgaste na aresta transversal tem influência sobre a qualidade do furo, pois pode provocar uma má centralização da ferramenta no início do corte.
- Desgaste de cratera: ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito provocado pelo cavaco na superfície de saída da ferramenta.
- Deformação plástica da aresta de corte: tipo de avaria causada pela combinação de altas temperaturas e excesso de pressão na ponta da ferramenta, provocam o deslocamento de material e conseqüentemente, mudam a geometria da aresta de corte. Essa deformação pode levar a falha catastrófica da ferramenta (quebra).
- Lascamento: tipo de avaria que ocorre quando há a retirada de grandes partículas do material da ferramenta. No processo de furação, sua ocorrência indica batimento radial muito grande, quantidade insuficiente de fluido de corte e a presença de desgaste acima do permitido.

Conforme os autores Trent e Wright, 2000, Diniz et al., 2013, Machado et al., 2015, e Sandvik Coromant, 2018, os mecanismos mais comuns que levam à falha da ferramenta são esclarecidos a seguir.

- Abrasão mecânica: o atrito é a principal causa dos desgastes, principalmente o de flanco. A temperatura de corte tende a diminuir a dureza da ferramenta deixando-a mais propensa a ação de partículas duras presentes no material usinado, favorecendo o desgaste abrasivo.
- Adesão: ocorre nas interfaces ferramenta-cavaco e ferramenta-peça usinada, quando os dois materiais entram em contato com baixos valores de velocidade de corte e de temperatura, havendo a formação de um extrato intermetálico que provoca a aderência dos mesmos. Quando a camada de material aderido à superfície de saída da ferramenta encrua a ponto de aumentar sua resistência mecânica, é formada a aresta postiça de corte (APC). Esta APC tende a crescer gradualmente até se romper de forma brusca, retirando material da ferramenta e ocasionando microlascamentos da aresta de corte, além de poder se aderir à superfície usinada, prejudicando o acabamento. Esse fenômeno de separação com a ruptura de um dos materiais é chamado de *attrition* (aderência e arrastamento) e a superfície resultante é caracterizada por apresentar grande rugosidade. Na furação, a ausência de cobertura na broca favorece a formação de APC.
- Difusão: ocorre com a transferência de material a nível atômico, sendo fortemente dependente da temperatura, do tempo de contato e da afinidade química entre os materiais envolvidos. É a principal causa do desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta, encontrando em sua interface com o cavaco, condições necessárias para a sua ocorrência (altas temperaturas e velocidade de saída do cavaco próxima à zero).
- Oxidação: provocada pela combinação entre ar, água e altas temperaturas, pode causar o desgaste de entalhe, ocorrendo frequentemente na interface cavaco-ferramenta. Os fluidos de corte, em sua maioria, não são os responsáveis pela ocorrência desse mecanismo por possuírem elementos antioxidantes em suas composições, mas a sua má conservação pode provocar corrosão na ferramenta.

Nas diversas pesquisas que envolvem a vida da ferramenta no processo de furação [Zeilmann e Slomp, 2007, Sharman et al., 2008, Attanasio et al., 2017, e Yi et al., 2017], o tipo de desgaste mais avaliado é o de flanco. Em um exemplo deste tipo de pesquisa Sultan et al., 2015a, utilizaram broca de metal-duro sem revestimento para furar um aço inoxidável austenítico (AISI 316) e verificaram que menores valores de velocidade de corte e avanço resultaram em maior vida útil da ferramenta. Os autores perceberam que durante a furação, o desgaste de flanco observado aumentou rapidamente em todas as velocidades de corte e avanços aplicados devido à maior quantidade de material removido, sendo a adesão o mecanismo de desgaste mais proeminente.

Outro trabalho importante foi realizado por Uçak e Çiçek, 2018. Os autores analisaram a influência das condições de corte na furação de Inconel 718, e conseguiram identificar os vários tipos de avarias e desgaste que ocorrem em uma broca de metal-duro, sendo também verificada a influência da condição lubrificante empregada. As imagens registradas das brocas estão apresentadas na Figura 2.6, adaptada de Uçak e Çiçek, 2018. Na usinagem a seco (Figura 2.6a), as altas forças de avanço e de temperatura na zona de corte causaram desgaste na aresta transversal, lascamento e desgaste de flanco não uniforme. Também devido às temperaturas no corte, a ausência de refrigeração e lubrificação, e pela ductilidade do material usinado, foi identificada a presença de APC e de material aderido na superfície de saída da ferramenta. Na condição criogênica (nitrogênio líquido) (Figura 2.6b), o lascamento foi a avaria dominante, provavelmente ocorrendo devido às forças de corte muito altas resultantes da grande refrigeração do material. As menores temperaturas provocadas pela refrigeração levaram o material a exibir um maior encruamento, apresentando grande resistência ao corte. A Figura 2.6c apresenta imagens da broca utilizada sob a condição abundante. Esta foi a que apresentou o melhor desempenho dentre as utilizadas nas três condições. Por ser a única broca com ação lubrificante, o corte ocorreu com menor atrito e menor adesão de material.

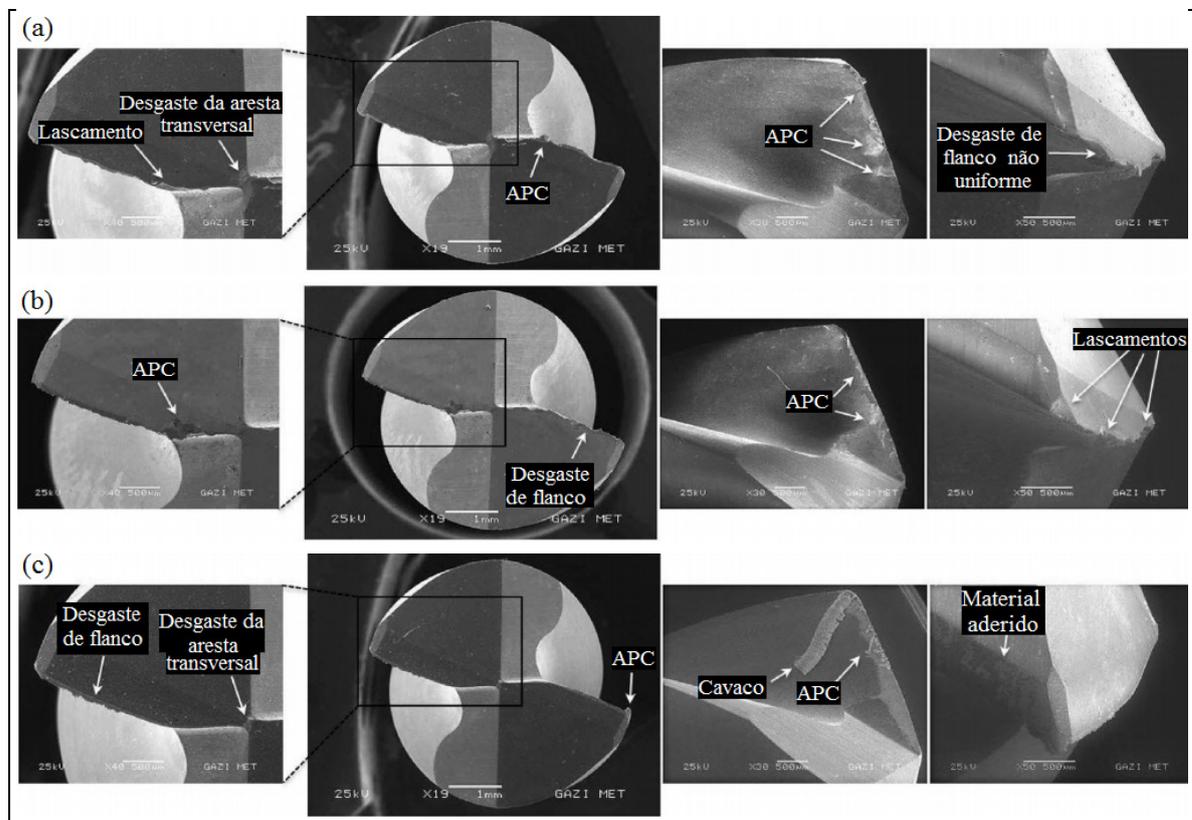


Figura 2.6 – Tipos de desgaste presentes na broca após a execução de furos com as condições: (a) a seco, (b) criogênica e (c) abundante.

2.3.2 Formação do cavaco

Os mecanismos que envolvem a formação do cavaco geralmente são explicados, para todos os processos de usinagem, através do modelo do corte ortogonal [Sultan et al., 2015b], como esquematizado na Figura 2.7, adaptada de Astakhov e Davim, 2008. Este modelo, de acordo com Machado et al., 2015, esclarece que o cavaco se inicia com a ação de penetração da aresta cortante da ferramenta no material, pressionando-o de tal maneira que o mesmo sofre deformações elástica e plástica até ocorrer a ruptura que normalmente se dá por cisalhamento, provocado pela formação e propagação de trincas. Com a contínua penetração da ferramenta, haverá ruptura parcial ou completa do material deformado (cavaco), que será escorregado sobre a superfície de saída da ferramenta deixando a região de corte.

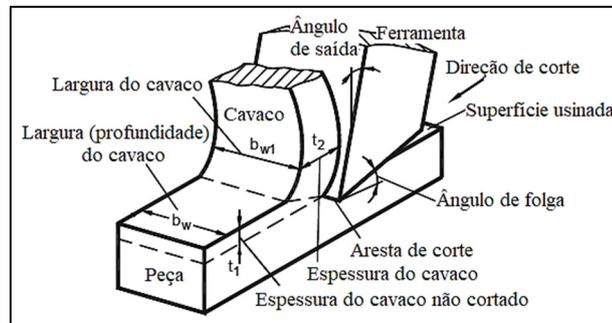


Figura 2.7 – Mecanismo de formação do cavaco por corte ortogonal.

Para a furação, esse modelo precisa de alguns ajustes, pois nas arestas de corte da broca a ação se dá de maneira oblíqua, com toda a geometria variando ao longo da ferramenta, como o ângulo de saída, por exemplo [Guibert et al., 2009; Bordin, 2013]. Dolinsek, 2003, auxilia na visualização da formação do cavaco na furação do AISI 321, ao apresentar micrografias com a contribuição de cada parte da aresta de corte no processo (Figura 2.8a, adaptada). A sequência de imagens começa com o início do processo de formação do cavaco que ocorre principalmente devido à intensa deformação plástica, causada pela baixa velocidade de corte e pela alta força de avanço na aresta transversal. O cavaco formado vai se tornando mais espesso à medida que se transforma ao longo da superfície de saída da broca. Uma parte do cavaco, de espessura muito fina e encruada, passa pelo centro da broca, indo atuar como APC junto à aresta principal.

Complementando o entendimento sobre o assunto, Ke et al., 2005, destacam outras diferenças que existem na formação contínua do cavaco na furação, quando comparado com outros processos. A principal está na formação do cavaco que não se apresenta completa na saída da aresta principal, sendo o mesmo ainda deformado nas interações: com o canal da broca, que depende do seu ângulo de ponta e da geometria do canal (ângulo de hélice); e, com a parede

do furo. Outra diferença está no fluxo do cavaco que, devido à variação da velocidade de corte ao longo das arestas, faz com que se inicie em formato de cone, tendendo a escoar para o centro do furo e mantendo uma forma espiral (Figura 2.8b, adaptada de Ke et al., 2005). Se o cavaco não consegue manter esse comportamento à medida que o furo avança, seja por ductilidade ou grau de encruamento, ele se quebra ou é forçado a se mover pelo canal sem girar (forma um cavaco em fita). De acordo com Ke et al., 2005, o sucesso da furação está diretamente relacionado com a capacidade de produzir cavacos que possam ser facilmente ejetados do furo, enquanto ocorre o corte.

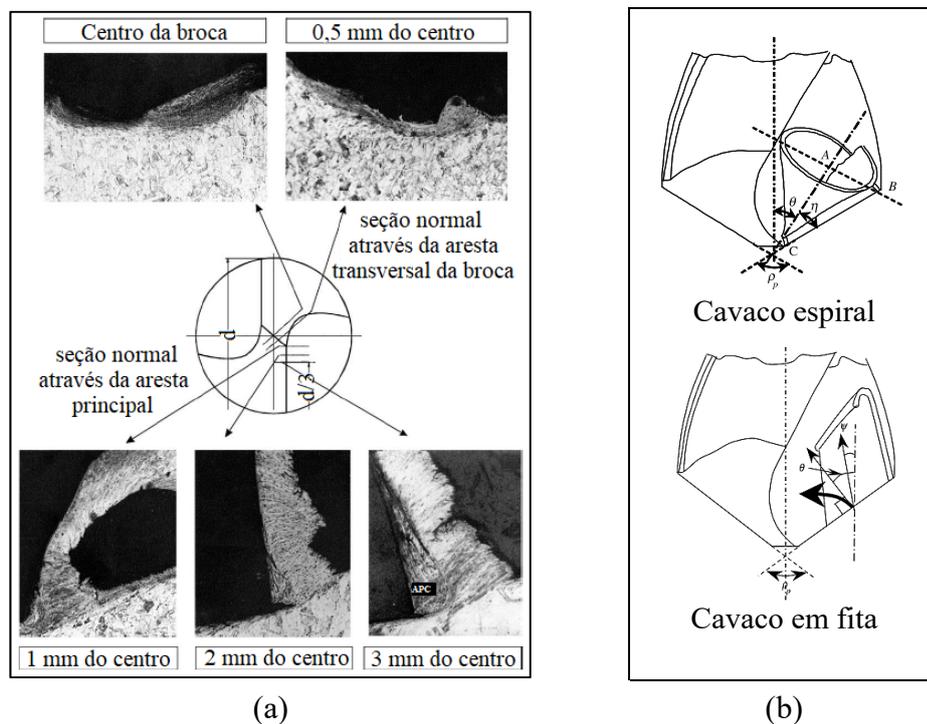


Figura 2.8 – Formação do cavaco na furação: (a) micrografias dos cavacos a diferentes distâncias do centro da broca; e, (b) fluxo natural dos cavacos.

2.3.3 Temperatura na furação

A temperatura gerada na zona de corte pode ser considerada uma das variáveis mais influentes nos processos de usinagem, constatada em diversos estudos e discussões a respeito da sua influência sobre o desempenho das ferramentas [Santos e Sales, 2007]. Grande parte da energia consumida no corte acaba sendo convertida em calor próxima à cunha da ferramenta, e esta ação de aquecimento pode trazer efeitos benéficos, como a redução da tensão de cisalhamento do material, mas também pode apresentar muitos problemas econômicos e

técnicos relacionados à alteração dimensional da peça, modificações das propriedades do material, e diminuição da vida da ferramenta [Trent e Wright, 2000; Santos e Sales, 2007].

O calor na usinagem é gerado em três zonas de cisalhamento que fazem parte do processo de formação do cavaco. As três são descritas como se segue [Machado et al., 2015].

- Zona primária de cisalhamento: gera calor a partir do trabalho de cisalhamento interno do material. Nesta zona o calor gerado diminui a resistência mecânica do material causando o “efeito de amolecimento”, ou seja, facilita a deformação plástica;
- Zona secundária de cisalhamento, na interface cavaco-superfície de saída da ferramenta: gera calor a partir do atrito e da aderência, influenciando o desempenho da ferramenta já que a temperatura no local é afetada diretamente pelo aumento da velocidade de corte;
- Zona terciária de cisalhamento, na interface peça-superfície de folga da ferramenta: gera calor a partir do atrito e da aderência, que mesmo mínimo pode contribuir para o aumento da temperatura da ferramenta e da peça.

Na usinagem de aços, ferro fundido, titânio e ligas à base de níquel, há uma maior tendência a ocorrência de problemas, por serem materiais mais duros e com alto ponto de fusão. Logo, deve ser controlada a taxa de remoção de material que, acima de determinadas velocidades críticas, aquecem a ferramenta em demasia causando desgaste excessivo, em pouco tempo de usinagem [Trent e Wright, 2000].

A compreensão dos fatores que influenciam a geração de calor e a distribuição de temperatura na ferramenta e no material usinado é de grande importância [Trent e Wright, 2000]. Na furação, os maiores valores de temperatura são gerados ao longo das regiões de contato entre a broca e a peça usinada [Patne et al., 2017].

Li e Shih, 2007, identificaram na furação de titânio que os valores máximos de temperatura vão se movendo durante a execução do furo, iniciando na aresta transversal de corte e se deslocando até a região da aresta principal mais próxima à quina da broca, como pode ser visualizada na Figura 2.9, adaptada de Li e Shih, 2007, para duas velocidades de corte. Os autores também verificaram que a broca não apresentou um estado estacionário de temperatura, permanecendo crescente mesmo após 50 segundos de usinagem.

Na furação do AISI 304, Vas et al., 2016, identificaram um aumento de temperatura com o acréscimo da velocidade de corte, provavelmente causado pelo aumento da deformação plástica do material na lateral da broca, resultando em uma severa formação de cavacos. Uçak e Çiçek, 2018, mediram a temperatura do furo sendo usinado, verificando que a temperatura vai aumentando de acordo com a profundidade do furo, e que essa variação não depende do tipo de lubrificação aplicada externamente.

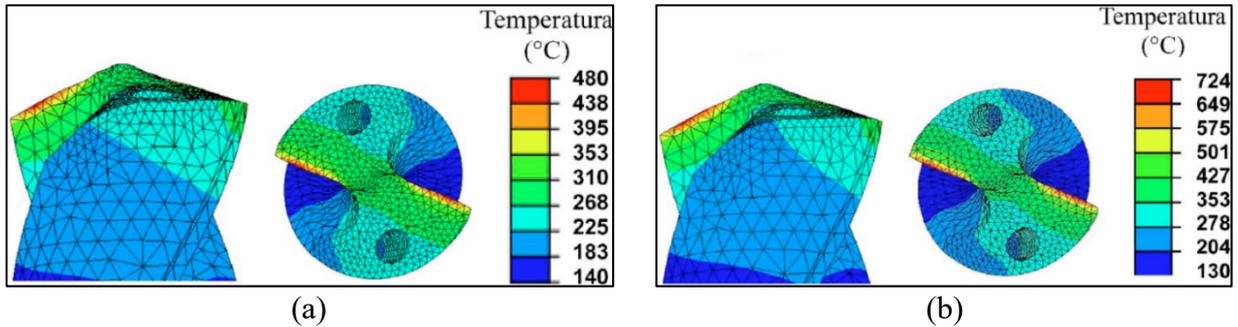


Figura 2.9 – Distribuição de temperatura na ponta da broca após 12,7 mm de comprimento de corte com (a) $v_c = 24,4$ m/min; (b) $v_c = 48,8$ m/min.

2.3.4 Esforços de corte

Durante a furação, os esforços de corte a que uma broca é submetida devem-se à força de avanço (F_f) e ao momento torsor (M_t). De acordo com Capello et al., 2008, a força que a broca executa no sentido de avançar (força vertical) é uma soma de vários fatores gerados ao longo do corte. Tem-se a presença das componentes da força de avanço (Figura 2.10, adaptada de Capello et al., 2008): nas arestas principais (F_{aa}), paralelas ao eixo da broca; na aresta transversal (F_{at}); nas guias (F_{bp}), devido ao atrito com a parede do furo; e, na superfície de saída (F_{cs}), devido ao atrito do fluxo de cavaco. A força de avanço total que age na broca é definida pela Equação 2.1.

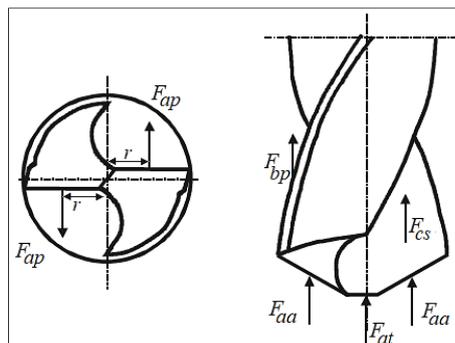


Figura 2.10 – Esforços de corte durante a furação.

$$F_f = 2 \cdot F_{aa} + F_{at} + F_{bp} + F_{cs} \quad (2.1)$$

Na Figura 2.11 tem-se um esquema apresentado por Guibert et al., 2009, que exibe a força de avanço (F_f) em relação à posição da broca durante a geração do furo. No primeiro momento (Figura 2.11a), a aresta transversal toca a peça sem apresentar grande capacidade de corte, extrudando o material e causando o aumento inicial da força. Com a entrada da aresta

transversal (Figura 2.11b), no segundo momento, começa o corte efetivo do material acrescentando F_f . No terceiro momento (c), com a entrada da aresta principal, o cavaco é totalmente formado chegando a um valor máximo de F_f . Após, a força permanece praticamente constante até cair à zero com o término do furo.

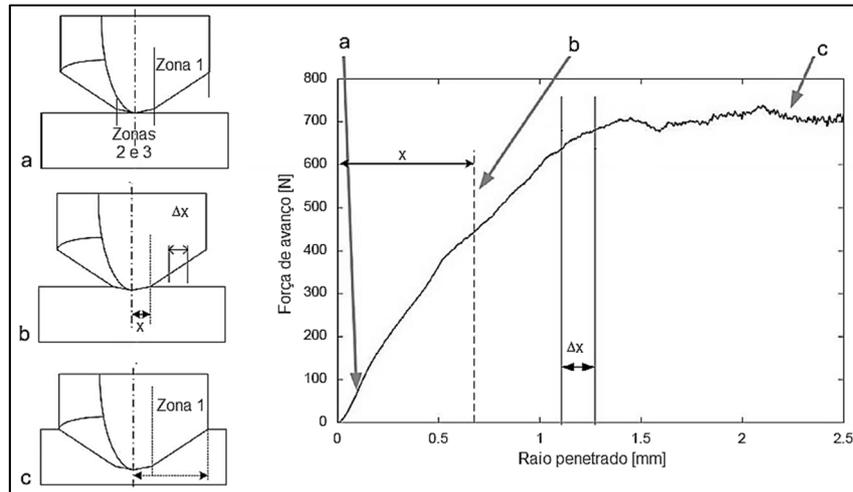


Figura 2.11 – Evolução da força de corte durante a furação: (a) início do furo, (b) zonas 2 e 3 no material e (c) toda a aresta de corte executando o furo.

O momento torsor (M_t) durante a furação, de acordo com Capello et al., 2008, é gerado pela soma: da força de corte nas arestas principais (F_{ap}) (Figura 2.10); e, pelos torques provocados pelo atrito entre a aresta transversal e o fundo do furo (T_{at}), entre as guias e a parede do furo (T_{bp}), e entre a superfície de saída e o fluxo de cavaco (T_{cs}). O momento torsor é dado pela Equação 2.2, sendo r a distância do centro da broca onde a força de corte é aplicada.

$$M_t = (2 \cdot F_{aa} \cdot r) + T_{at} + T_{bp} + T_{cs} \quad (2.2)$$

O momento torsor tem comportamento semelhante à força de avanço sendo que a maior diferença se dá quando a aresta principal finaliza sua contribuição no furo, restando ainda o torque do atrito da superfície do furo com as guias da broca, de modo que o seu valor não cai à zero repentinamente. Ambos os esforços de corte sofrem influência da geometria e do desgaste da ferramenta, do material usinado, da presença de um meio lubrificante/refrigerante, e da relação entre velocidade de avanço e velocidade de corte [Capello et al., 2008].

2.3.5 Rugosidade da superfície usinada

Na engenharia, a integridade de uma superfície pode ser definida como um conjunto de propriedades que comprometem o desempenho desta, quando utilizada [Astakhov, 2010b]. De

acordo com Machado et al., 2015, o conceito de integridade da superfície envolve características relacionadas a superfície em serviço (acabamento), e as mudanças que estão abaixo dela (alterações subsuperficiais). Dentre as alterações relacionadas ao acabamento, também chamado de textura da superfície, tem-se a rugosidade.

Em um processo de usinagem, a rugosidade é inevitável por ser originada basicamente pela ferramenta de corte durante a remoção dos cavacos [Petropoulos et al., 2010]. Uma tendência geral de abordagem da quantificação da amplitude da rugosidade está dividida de duas maneiras: na caracterização de perfis, baseado na medição de picos/vales; e, no controle de processos, medindo os valores médios [Whitehouse, 2014]. São vários os parâmetros empregados na quantificação da rugosidade, sendo selecionados pelo interessado aqueles que melhor representam a superfície analisada. Conforme a norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, podem ser notados os seguintes parâmetros:

- R_a , desvio aritmético médio (ou rugosidade média): média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de avaliação ou medição (Figura 2.12a);
- R_t , altura total do perfil (ou rugosidade total): soma da maior altura dos picos e da maior profundidade dos vales do perfil, no comprimento de avaliação ou medição (Figura 2.12b).

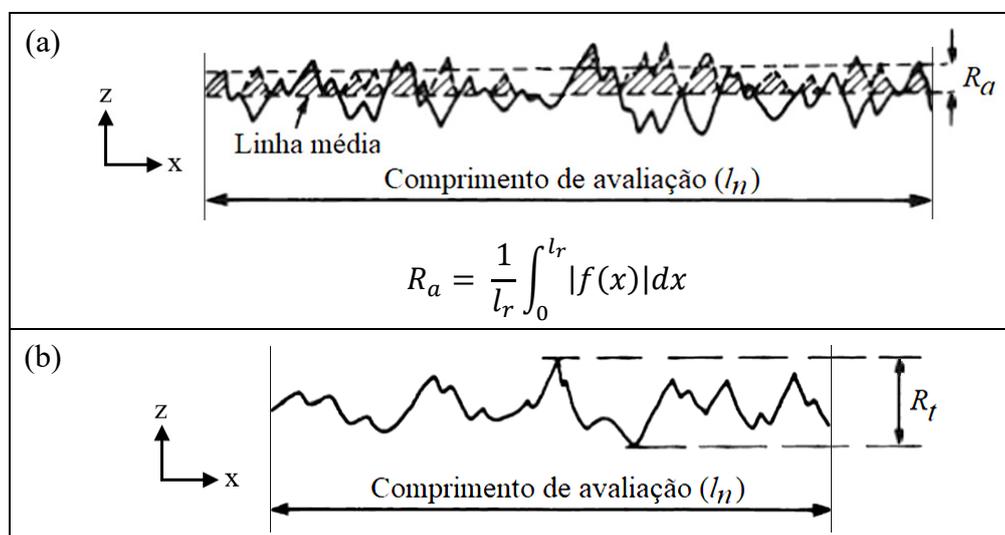


Figura 2.12 – Representação gráfica da rugosidade: (a) média; (b) total.

Conforme a norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, o comprimento de avaliação (l_r), ou de medição, é entendido como sendo o comprimento na direção do eixo x, usado para estabelecer o perfil sob avaliação, podendo conter diversos comprimentos de amostragem (l_r). O comprimento de amostragem, também chamado de *cut-off*, é definido como sendo o comprimento na direção do eixo x usado para identificar as irregularidades características do

perfil sob avaliação. A Norma ABNT NBR ISO 4288, 2008, tem por recomendação a utilização de um comprimento de avaliação igual a cinco vezes o comprimento de amostragem ($l_n = 5 \cdot l_r$).

Na prática industrial, o parâmetro de rugosidade R_a tem sido considerado suficiente, de um modo geral, para caracterizar uma superfície, apesar de apenas representar um valor médio que não recebe influência de efeitos eventuais. Havendo a necessidade, outros parâmetros podem ser aplicados, como o parâmetro R_t que sofre influência direta de defeitos e irregularidades da superfície [Petropoulos et al., 2010; Machado et al., 2015].

Apesar da furação com broca helicoidal, de maneira geral, ser considerada um processo de desbaste, a utilização de ferramentas modernas possibilita alcançar furos considerados como de boa qualidade, em que operações subseqüentes para melhorar a precisão e a rugosidade da superfície geralmente não são necessárias [Tschätsch, 2009; Ruszaj et al., 2010]. Tschätsch, 2009, caracteriza como operação de acabamento o furo gerado por broca helicoidal com R_t de até 20 μm . De acordo com Ruszaj et al., 2010, para furos obtidos por brocas de metal duro inteiriças há a possibilidade de se encontrar valores para R_a de até 1,0 μm , dependendo do comprimento da broca e dos parâmetros de usinagem utilizados.

Várias pesquisas têm sido realizadas objetivando estudar a rugosidade resultante das superfícies produzidas pela furação, em função das diversas variáveis de entrada do processo. Bordin, 2013, e Silva, 2016, verificaram diferenças nos valores de rugosidade da entrada em relação à saída em um mesmo furo. Na entrada, os maiores valores foram associados a uma maior interação (atrito) do cavaco e das guias da broca com a parede do furo. Rahim e Sasahara, 2011, investigaram a aplicação de MQL na furação do Inconel 718 e encontraram que o aumento da velocidade de corte diminui o valor da rugosidade resultante. Com o acréscimo da velocidade de corte, o comprimento de contato do cavaco com a superfície de saída da ferramenta diminui, reduzindo assim a força necessária ao corte, além de diminuir a tendência à formação de APC. Na furação do AISI 304, Balaji et al., 2016, identificaram que o aumento da velocidade de corte e do avanço geraram menores valores de rugosidade.

A rugosidade da superfície obtida em um processo de furação é formada por irregularidades finas (erros microgeométricos), resultantes da ação conjunta do avanço e da rotação da ferramenta, necessários para a formação do furo, juntamente com outros fatores como a presença de APC, a saída do cavaco, e o conseqüente desgaste da broca [Bordin, 2013; Machado et al., 2015]. Logo, o perfil de rugosidade e a textura da superfície do furo tendem a apresentar muitas irregularidades como as encontradas por Bordin, 2013, e apresentadas de maneira adaptada na Figura 2.13. A principal característica é a presença de material aderido, principalmente no início do furo, que causa uma maior quantidade de picos e vales no perfil de

rugosidade. Nicola et al., 2010, defende que possa haver um certo comportamento oscilatório entre o contato da aresta de corte com a superfície resultante, de maneira que parte do material que deveria deixar a zona de corte, na forma de cavaco, acaba escapando pela superfície de folga, formando uma microcamada aderida à superfície final usinada (material caldeado).

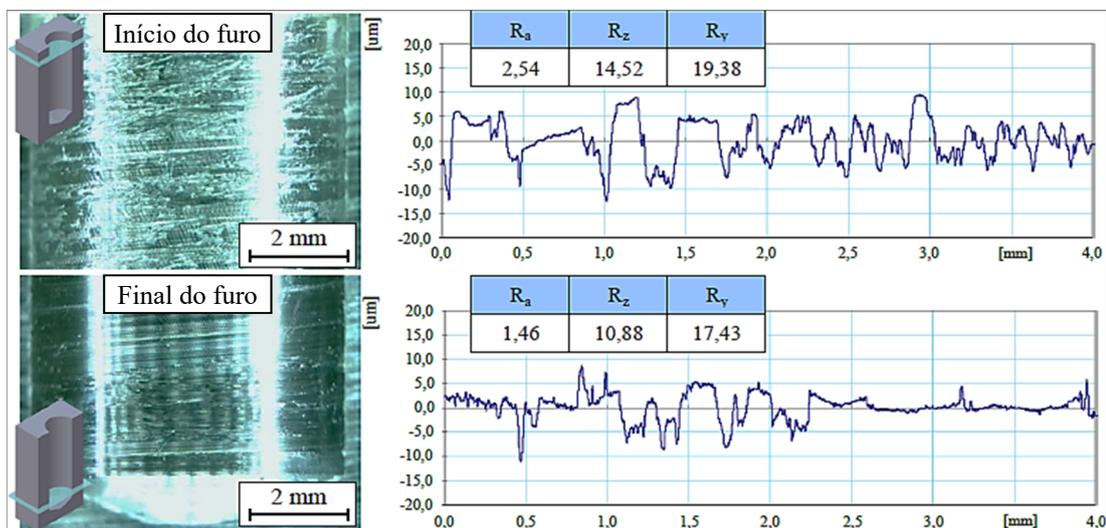


Figura 2.13 – Imagens da textura e perfis de rugosidade após a furação do aço ABNT P20.

2.3.6 Desvios dimensionais e geométricos do furo

Quando se objetiva avaliar a qualidade de uma peça usinada, de um modo geral, a mesma é examinada em relação à sua microgeometria (rugosidade) e também, à sua macrogeometria (dimensões, forma e orientação) [Machado et al., 2015]. No processo de furação, a broca precisa executar a quebra e a extração dos cavacos com muita agilidade, para que, entre outras características, a integridade das paredes do furo seja preservada [Wosniak, 2011]. Deste modo, para a avaliação da macrogeometria do furo, são normalmente analisados os desvios dimensionais e geométricos de forma (circularidade, cilindricidade etc.).

O desvio dimensional é interpretado como a diferença entre o diâmetro nominal da broca empregada, e o diâmetro real do furo obtido. Utilizando ferramentas modernas, Ruszaj et al., 2010, afirmam ser possível produzir furos com boa qualidade, sem haver a necessidade de operações seguintes para aprimorar a precisão. São alcançados valores de tolerâncias de furos de até, e inclusive, IT8 utilizando brocas de metal duro inteiriças, considerando também alguns fatores, como os parâmetros de usinagem aplicados. A partir da norma ABNT NBR 6409, 1997, entende-se desvio de circularidade como a diferença entre a forma do furo obtido com um formato circular teórico.

Em diversos trabalhos é estudada a influência dos parâmetros envolvidos no processo de furação com os desvios dimensional e de circularidade. Grzesik, 2008, alega que os três principais fatores que geram erros no acabamento da usinagem de precisão são: o desgaste da ferramenta, as forças de corte e a temperatura gerada.

Santana, 2015, na furação do aço SAE 4144M verificou que o desvio dimensional na saída do furo foi menor que o apresentado na entrada. Essa redução pode ter sido ocasionada pelo aumento da temperatura durante o processo de formação do cavaco na região de saída do furo, causando a dilatação do material durante o corte, e logo depois a contração. Em relação à circularidade, o início do furo apresentou maiores valores, causado pelo maior tempo de atrito do cavaco com essa região da superfície usinada, e/ou pela instabilidade da ferramenta no início do furo devido à ausência de furo-de-centro.

Sultan et al., 2015a, identificaram a influência da velocidade de corte sobre o desvio dimensional do furo. O aumento da rotação do eixo da máquina-ferramenta torna maior a vibração durante o corte, causando desvios na dimensão do furo. Também foi identificada a influência da velocidade de corte sobre o desvio de circularidade [Sultan et al., 2015a; Ankalagi et al., 2017]. O aumento da velocidade de corte levou a uma maior temperatura, devido ao aumento do atrito, resultando em maiores desvios de circularidade.

O batimento radial da broca é um fator muito importante no processo de furação, pois afeta a vida útil da ferramenta, tendo efeito sobre a precisão da usinagem [Astakhov, 2010]. O erro desta tolerância geométrica refere-se ao desalinhamento na direção radial, significando que o centro da ponta da broca está fora do seu centro de rotação. Este desalinhamento deve ser minimizado, pois, altera o ângulo de posição da ferramenta durante o corte [Smith, 2008].

Na prática, este erro é uma característica inerente de qualquer broca devido às tolerâncias de sua fabricação, à precisão de montagem no suporte da broca (mandril), ao desvio do eixo da máquina-ferramenta, entre outros. Como resultado, os esforços de corte podem ser desbalanceados, causando vários problemas na furação como o desvio do eixo longitudinal (cilindricidade) e distorções na forma geométrica (ovalização) do furo usinado. Quanto menor a resistência mecânica do material e maior a relação do comprimento com o diâmetro da broca, maior é a tendência ao erro de batimento radial [Astakhov, 2010]. A norma DIN 6499 recomenda, para os sistemas de fixação do tipo mandril porta-pinça, tolerância de batimento radial variando entre 20 e 40 μm [Cavichioli, 2016].

Martins, 2008, utilizando diferentes sistemas de fixação de broca, constatou que o erro de batimento radial não tem influência sobre a dimensão do furo. Enquanto que, a circularidade apresentou maiores valores de desvio para o sistema de fixação com menor rigidez. Também

foi verificado que o erro de batimento radial não evoluiu com o comprimento de usinagem. Figueiredo, 2015, também encontrou influência do erro de batimento radial sobre a circularidade, na furação de ferro fundido nodular. O autor acredita que o erro alterou a força de corte, que por sua vez, modificou a geometria do furo.

2.4 Projeto de experimentos

Na usinagem dos materiais a maioria das suas características resultantes (vida da ferramenta, esforços de corte, acabamento da superfície usinada) é determinada de modo experimental; então, qualquer melhoramento na ferramenta, na máquina ou em todo o processo depende de estudos experimentais. Como estes podem ser caros e demorados, é de interesse do pesquisador se atentar, com responsabilidade, à metodologia referente ao modo de aquisição dos dados e à construção do modelo estatístico que será empregado [Astakhov, 2006].

A metodologia dos testes aplicados na usinagem alcançou significativo avanço com a utilização de técnicas de projeto de experimentos, que envolvem o processo de planejamento da experimentação, para que dados apropriados sejam coletados e analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas [Astakhov, 2006; Montgomery, 2009]. São utilizados vários métodos matemáticos para a construção, avaliação e análise dos dados dos experimentos, como a “Metodologia de Superfície de Resposta” (MSR).

Entende-se a MSR como um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas aplicáveis na modelagem e análise de situações em que a resposta interessada seja influenciada por muitas variáveis [Montgomery e Runger, 2012]. O objetivo está na determinação das condições operacionais ótimas para o processo (otimização), ou na determinação de uma região do espaço do fator em que os requisitos do processo estão satisfeitos [Montgomery, 2009]. De acordo com Werkema e Aguiar, 1996, o planejamento por MSR fornece superfícies tridimensionais e gráficos de contorno, que esclarecem o modo pelo qual os fatores controlados na pesquisa têm influência sobre a variável resposta. Os projetos para a execução da MSR são chamados de projetos de superfície de resposta, podendo ser citados como exemplos: o Composto Central (*Central Composite Design – CCD*) e o Box-Behnken (*Box-Behnken Design – BBD*).

O BBD é uma classe de projetos fatoriais de três níveis incompletos, utilizado para o estudo de variáveis quantitativas [Box e Behnken, 1960]. Para três fatores, o BBD pode ser representado graficamente como um cubo (Figura 2.14) que consiste de um ponto central e de três projetos fatoriais 2^2 interligados. O número de experimentos (N) requeridos para o desenvolvimento de um BBD é definido pela Equação 2.3, sendo k o número de fatores, e C_0 a

quantidade de pontos centrais [Ferreira et al., 2007]. Para um experimento com três fatores (x_1 , x_2 e x_3) e três níveis (-1, 0 e 1), são comumente realizados 15 experimentos, sendo 12 relacionados às combinações dos valores de dois fatores, com um fator no nível médio, e três relacionados ao ponto central (nível médio de cada fator) que é realizado por três vezes para verificar a repetitividade do experimento [Baumgaertner Filho, 2017].

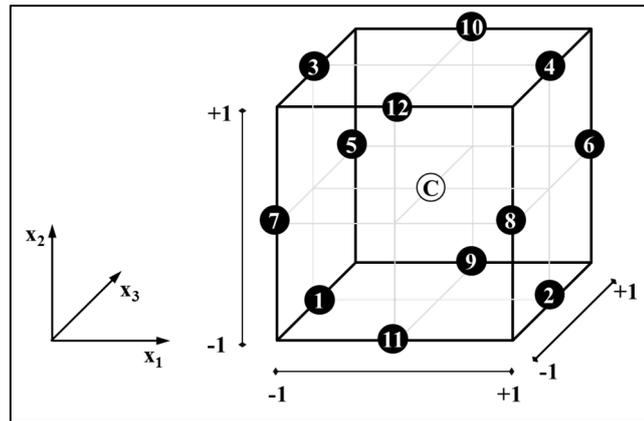


Figura 2.14 – Representação gráfica do projeto de Box-Behnken para três fatores.

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (2.3)$$

BBD é um projeto que possui a vantagem ao não necessitar de muitos experimentos para ter resultado, além de permitir estimar os parâmetros do modelo quadrático e detectar a falta de ajuste do modelo [Ferreira et al., 2007; Montgomery, 2009]. Outra vantagem é que o mesmo não possui combinações nas quais todos os fatores estão simultaneamente em seus maiores ou menores níveis (vértices da região cúbica), sendo útil para os casos em que se deseja evitar condições extremas e restritivas [Ferreira et al., 2007].

O BBD pode ser utilizado na análise dos efeitos principais e quadráticos, e das interações entre os fatores selecionados como variáveis de entrada do processo, em relação às variáveis respostas necessárias para o estudo. A relação ocorre através de um modelo equacional quadrático (Equação 2.4) sendo Y a variável resposta; x_1 , x_2 e x_3 os fatores selecionados; b_0 a interseção do plano; e, b_1 a b_{33} os coeficientes de regressão.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (2.4)$$

A aplicação do BBD em pesquisas na área de processos de fabricação, mais especificamente na usinagem, pode ser encontrada em alguns trabalhos recentes auxiliando na

otimização dos parâmetros de corte e melhorando o entendimento das variáveis que envolvem os processos. Sathyamoorthy et al., 2017, utilizaram o BBD para otimizar os parâmetros de corte e alcançar menores valores de rugosidade no fresamento de acabamento da liga de magnésio AM60. O mesmo objetivo foi alcançado por Benlahmidi et al., 2016, no torneamento do aço AISI H11. Já Mondal e Kumar, 2016, aplicaram o BBD para encontrar os parâmetros de corte que geraram os menores valores dos esforços de corte durante a furação a seco de um aço macio. No torneamento de Inconel 718, Manohar et al., 2013, otimizaram os parâmetros envolvidos, alcançando menores valores de rugosidade e maior remoção de material, com um número mínimo de experimentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Estão descritos neste capítulo os materiais e métodos utilizados na execução do experimento relativo ao estudo do processo de furação do aço inoxidável AISI 304 com diferentes condições lubrificantes, e na avaliação dos seus resultados. O método experimental utilizado está baseado na análise do comportamento do furo usinado quando da aplicação de lubrificante com a adição de flocos de multicamadas de grafeno (MLG) sob a técnica de quantidade reduzida (RQL), comparado com outras condições de lubrificação (aplicação de fluido integral sintético através da técnica de quantidade reduzida e por jorro em quantidade abundante). O procedimento utilizado consistiu das seguintes etapas:

- determinação das dimensões do corpo de prova e caracterização do seu material;
- especificação da máquina-ferramenta e seleção da ferramenta de corte adequada;
- determinação das condições de lubrificação, para efeito de comparação;
- furação dos corpos de prova, com monitoramento dos esforços de corte;
- medição da rugosidade resultante das paredes dos furos;
- medição dos desvios dimensional e de circularidade dos furos produzidos;
- cálculo dos valores médios e das incertezas de medições das variáveis respostas;
- planejamento estatístico do experimento;
- registros complementares.

3.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados foram cortados a laser de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304 com dimensões de $60 \times 15,9 \times 9,9$ mm, conforme Figura 3.1. Optou-se por realizar o processo de furação sem a presença de furo de centro, e de modo passante, operação comumente desenvolvida por brocas helicoidais com ponta autocentrante.

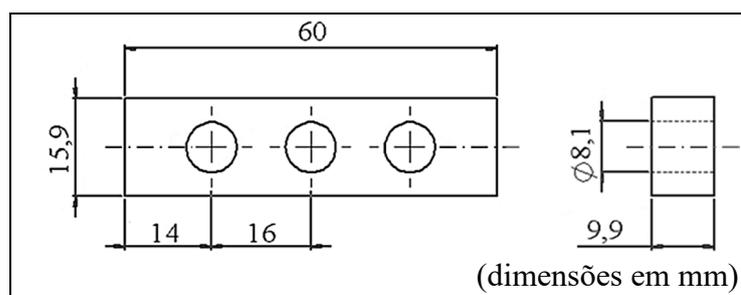


Figura 3.1 – Dimensões do corpo de prova.

A composição química do material foi verificada pelo Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF/UFRGS) por meio de espectrometria de emissão óptica e os valores encontrados estão apresentados na Tabela 3.1 juntamente com a composição padronizada para o AISI 304 [ASM, 1990]. Também foi verificada a dureza do material utilizando um microdurômetro Shimadzu, tipo M, localizado no Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados (LAPMA/UFRGS). Empregou-se uma carga de 300 gf (2,94 N) com um intervalo de 15 s de repouso da ponteira de diamante sobre a amostra, previamente lixada e polida, sendo feita cinco medições. O material apresentou um valor médio de dureza de (170 ± 5) HV.

Tabela 3.1 – Composição química do AISI 304 (% em massa).

Elemento	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Co	Cu	Mo	P	C	S
Verificado	71,30	17,83	8,52	1,22	0,47	0,17	0,16	0,15	0,04	0,05	0,01
Padronizado	-	18-20	8-12	2,00 (máx.)	1,00 (máx.)	-	-	-	0,04 (máx.)	0,08 (máx.)	0,03 (máx.)

3.2 Máquina-ferramenta e ferramenta de corte

A execução dos furos ocorreu no centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 308, equipado com comando numérico computadorizado Mach 8 (Figura 3.2), localizado no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS). A máquina-ferramenta possui rotação máxima de 4000 rpm, potência máxima de 5,5 kW (7,5 cv) e os cursos dos eixos x, y e z são, respectivamente, 450 mm, 310 mm e 410 mm.



Figura 3.2 – Centro de usinagem utilizado para a execução dos furos.

Como ferramentas de corte utilizou-se brocas helicoidais de metal-duro Walter Titex modelo DC150-03-08.100A0-WJ30RE. As especificações geométricas das ferramentas,

fornecidas por Walter Titex, 2015, estão apresentadas na Figura 3.3. As brocas possuem 8,1 mm de diâmetro, revestimento de TiAlN (nitreto de titânio e alumínio), aplicação externa de refrigeração e ponta autocentrante¹ com afiação cruzada e ângulo de ponta $\sigma = 140^\circ$.

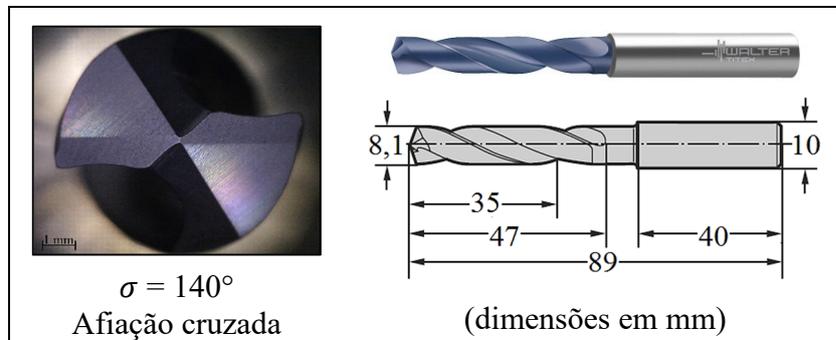


Figura 3.3 – Geometria e dimensões da ferramenta de corte utilizada no experimento.

Para a fixação da ferramenta no centro de usinagem utilizou-se o mandril porta-pinça BT30ER25060AD KTA® (norma DIN 6499) com concentricidade de $5 \mu\text{m}$, conforme o fabricante [KTA, 2013]. O erro de batimento radial das ferramentas foi verificado na quina da broca utilizando o relógio comparador Digimess modelo 121.304, com resolução de $10 \mu\text{m}$ e exatidão de $\pm 15 \mu\text{m}$, auxiliado por um suporte com base magnética (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Verificação do erro de batimento radial da broca com relógio comparador.

Para cada retirada do mandril porta-pinça da máquina-ferramenta para registro de imagens da broca, uma nova verificação do batimento era realizada. Os valores medidos

¹ Brocas com geometria autocentrante apresentam remoção parcial ou total da aresta transversal de corte. A afiação cruzada promove este efeito ao retificar um plano na superfície de folga da ferramenta. Com isso, há uma maior estabilidade no início da furação, evitando ou minimizando a realização de furos excêntricos [Stemmer, 1995; Asthakov, 2010a; Diniz et al., 2013].

ficaram próximos a 10 μm em todos os testes realizados. Este valor está dentro do intervalo recomendado pela NBR 6499 (abaixo de 40 μm).

3.3 Condições de lubrificação

Foram utilizadas três condições de lubrificação na execução deste experimento:

- fluido integral sintético aplicado em quantidade reduzida – “RQL”;
- fluido integral sintético com adição de flocos de multicamadas de grafeno aplicado em quantidade reduzida – “RQL+MLG”;
- fluido de corte biodegradável aplicado em quantidade abundante.

Na condição RQL, utilizou-se o fluido integral sintético à base de água Quimatic Jet (Tapmatic®), desenvolvido especificamente para a aplicação por nebulização. O mesmo foi aplicado a uma pressão do ar comprimido de 4 bar empregando, como sistema aspersor, o Nebulizador IV do mesmo fabricante (Figura 3.5a, adaptada de Quimatic, 2018).

Na condição RQL+MLG, foi utilizado o mesmo fluido descrito acima com a diferença de ter misturado ao mesmo, flocos de multicamadas de grafeno a uma concentração mássica de 0,05%. A mistura foi realizada no Laboratório de Filmes Finos e Processos de Plasma da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (LFFPP/UFTM). Esses flocos foram obtidos por clivagem (esfoliação) de blocos de grafite natural realizado por um processo ultrassônico, possuindo por fim, cerca de 10 μm^2 de área e 13 nm de espessura [Machuno et al., 2015]. Nesta condição também se utilizou ar comprimido a uma pressão de 4 bar.

Para a condição com aplicação de lubrificante em abundância, foi empregado o fluido de corte biodegradável Fluid B90 produzido pela Bondmann Química. O sistema de lubrificação que fornece o fluido em abundância, incluso ao centro de usinagem, proveu uma vazão constante aproximada de 540 l/h.

O bico aplicador dos fluidos foi mantido na mesma posição. Para as três condições, a Figura 3.5b mostra que, foi respeitada uma distância de 40 mm em relação ao centro do furo na superfície do corpo de prova, com um ângulo de 30° do bico em relação à ferramenta de corte.

3.4 Sistema de aquisição de sinais dos esforços de corte

A força de avanço (F_f) e o momento torsor (M_t) gerados com a furação foram monitorados durante todo o experimento para que fossem verificados seus comportamentos nas diferentes combinações de fatores utilizando o sistema de aquisição de sinais disponível no LAUS/UFRGS. Os sinais foram adquiridos através do dinamômetro piezelétrico estacionário

Kistler modelo 9272. O condicionamento desses sinais (amplificação e filtragem) foi realizado pelo amplificador de carga Kistler modelo 5070A10100, e o processamento pelo *software* LabVIEW™ 9.0. A taxa de aquisição de dados foi de 5000 pontos por segundo (5 kHz) para todos os testes nas três condições de lubrificação.

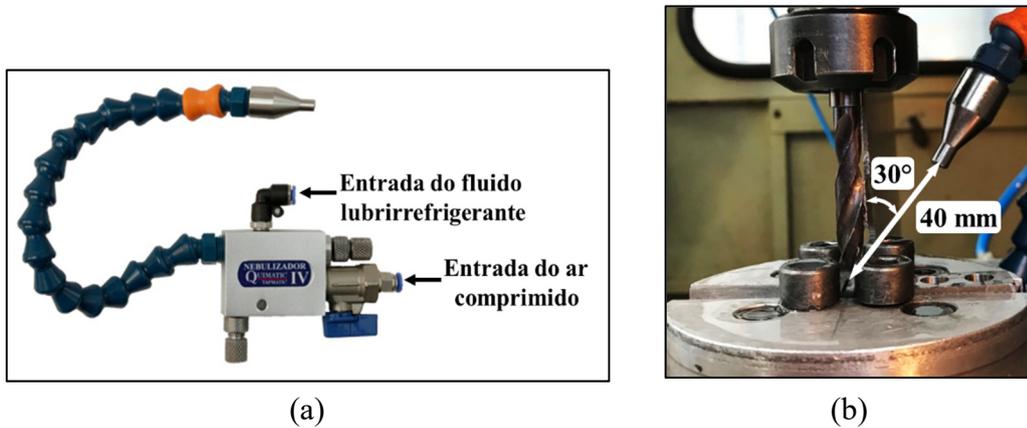


Figura 3.5 – Condições de lubrificação: (a) sistema aspersor; (b) posição do bico.

Para uma correta leitura dos esforços de corte e para facilitar a execução dos testes, uma base em alumínio foi fabricada para a fixação do corpo de prova durante a furação (Figura 3.6). O suporte foi parafusado no dinamômetro de modo que os furos sempre ocorressem centralizados à mesma e que as rebarbas resultantes não fossem deformadas durante sua formação. Os corpos de prova foram fixados na base por quatro parafusos, garantindo repetitividade em seu posicionamento e rigidez durante a execução dos furos.

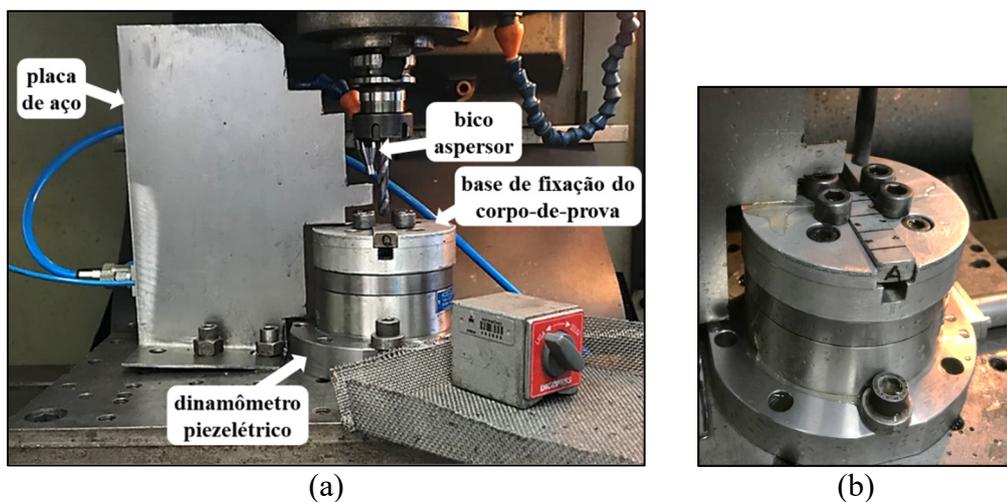


Figura 3.6 – Fixação dos corpos de prova: (a) montagem do sistema; (b) base de fixação.

Baseado em experiências anteriores à execução dos testes, empregou-se uma placa de aço ABNT 1045 presa à estrutura do centro de usinagem. O objetivo de utilização da mesma

foi a proteção da posição do bico aspersor de fluido lubrificador que poderia ser atingido por cavacos produzidos durante a execução do furo, alterando a sua posição.

Optou-se por analisar os valores correspondentes aos esforços de corte somente durante a ocorrência do corte “em cheio”, que ocorre quando a totalidade das arestas da broca estão executando o corte, e a área da seção transversal do cavaco permanece constante. O tempo de aquisição relacionado ao corte desta região está ilustrado na Figura 3.7, compreendido entre “ t_1 ” e “ t_2 ”. Na Figura 3.7a, o gráfico obtido a partir dos sinais adquiridos referente ao momento torsor exemplifica a região que representa os dados levados em consideração. Foram descartados os valores medidos no início do furo, em que se tem apenas a aresta transversal executando o corte (antes de t_1), e no fim do furo, em que não há a execução do corte por esta aresta (após t_2) (Figura 3.7b adaptada de Porto, 2017). Os valores médios dos esforços de corte correspondentes foram determinados e analisados pelo *software* MicrosoftTM Excel.

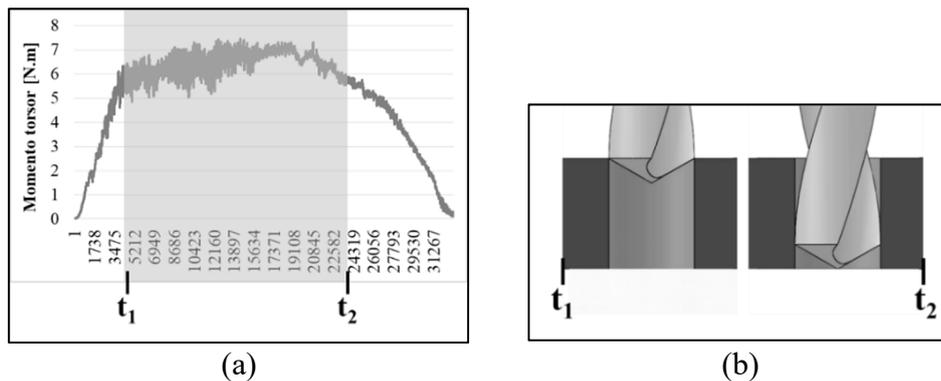


Figura 3.7 – Determinação dos valores médios dos esforços de corte: (a) área sombreada identificando a região; (b) ilustração do corte “em cheio”.

3.5 Medição de rugosidades

A textura dos furos foi analisada a partir da medição dos parâmetros rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t), conforme a norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, utilizando-se o rugosímetro portátil Mitutoyo® modelo Surftest SJ-201P com resolução de 0,01 μm , disponível no LAUS/UFRGS (Figura 3.8a). Os valores foram obtidos na região central do comprimento do furo, respeitando uma distância de cerca de 2 mm na entrada do mesmo, visando alcançar a região onde o corte ocorreu “em cheio”. Foram realizadas três medições em duas posições radiais no furo, 0 e 180°, totalizando seis valores medidos por furo. A Figura 3.8b apresenta as posições das medições dos parâmetros de rugosidade nos furos.

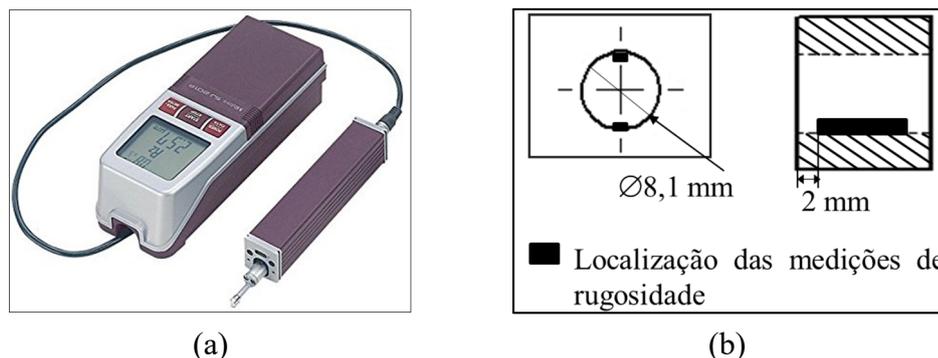


Figura 3.8 – Medição dos parâmetros de rugosidade: (a) equipamento utilizado; (b) posição das medições.

A norma ABNT NBR ISO 4288, 2008, recomenda um comprimento de amostragem $l_r = 0,8$ mm para valores de rugosidade média (R_a) entre 0,1 e 2 μm . Assim, utilizou-se um comprimento de avaliação $l_n = 5 \times 0,8 = 4$ mm.

Para auxiliar na análise dos parâmetros medidos, foram feitas imagens da textura dos furos. Utilizou-se o microscópio óptico Zeiss Axio Lab.A1, disponível no Laboratório de Tribologia (LATRIB/UFRGS), com aumentos de 50 e 100 vezes.

3.6 Determinação dos desvios dimensional e de circularidade

A medição dos desvios dimensional ($d\phi$) e de circularidade (dO) dos furos foi realizada na máquina de medição por coordenadas (MMC) Mitutoyo modelo QM-Measure 353 (LAUS/UFRGS), com precisão de 3 μm e resolução de 0,5 μm (Figura 3.9a). O procedimento de medição do desvio dimensional consistiu na leitura das coordenadas de três pontos na superfície do furo para determinar a planeza do corpo de prova, seguido por mais três pontos internamente. Para a obtenção do desvio de circularidade, também foram lidos três pontos na superfície e mais nove pontos na borda do furo. As medições dos desvios foram repetidas mais duas vezes, tanto na entrada, quanto na saída do furo, totalizando seis pontos obtidos por furo. A Figura 3.9b ilustra os pontos lidos durante as medições.

3.7 Determinação das incertezas de medições das variáveis respostas

Associado ao cálculo dos valores médios das variáveis de saída, determinou-se também um intervalo de valores (incerteza expandida U), com 95% de confiança, dentro do qual se encontra a componente aleatória relacionada aos erros ocorridos durante o processo de medição [Albertazzi e Sousa, 2008]. Este intervalo foi calculado utilizando a Equação 3.1.

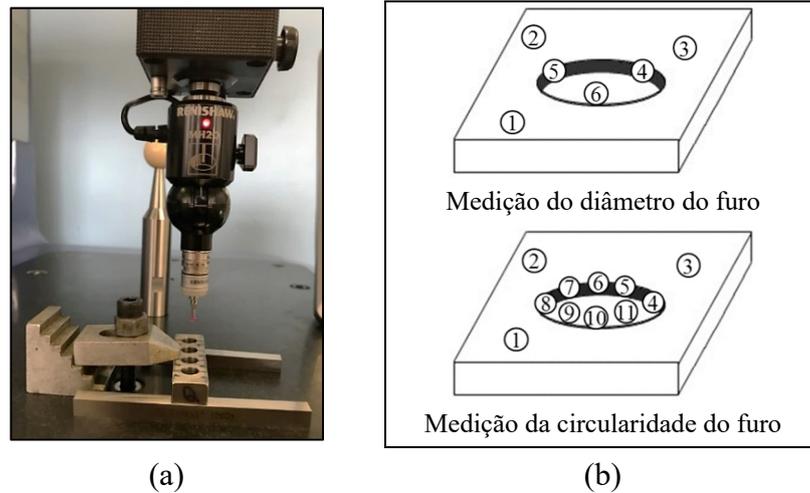


Figura 3.9 – Medição dos desvios dimensional e de circularidade: (a) posicionamento do corpo de prova na MMC; (b) posições de leitura no furo.

$$U = t u(I) = t \left(\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k - \bar{I})^2}{v}} \right), \quad \text{com } v = n - 1 \quad (3.1)$$

Sendo: t o coeficiente de Student correspondente ao número de graus de liberdade efetivos (v) e a 95% de confiança; $u(I)$ a incerteza-padrão dos valores medidos; I_k o k -ésimo valor medido; \bar{I} a média dos valores medidos; e, n o número de medições repetidas efetuadas

3.8 Planejamento experimental

Para a execução dos testes nas condições lubrificantes RQL e RQL+MLG foi aplicado o projeto de experimentos *Box-Behnken* (BBD) de três fatores, com cada fator variando em três níveis. Os fatores selecionados foram: velocidade de corte (v_c), avanço (f) e vazão do fluido (q) aplicado durante a execução do furo. Os níveis para v_c e f foram determinados em função dos dados fornecidos pelo fabricante da broca helicoidal escolhida. Esses valores correspondem ao nível 0 (médio). Já os níveis para q foram selecionados dentro da técnica de quantidade reduzida e que foram permitidos pelo nebulizador disponível para a execução do experimento. Na Tabela 3.2 tem-se os níveis de variação para cada fator.

Tabela 3.2 – Fatores e seus níveis selecionados para o projeto de experimento.

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
v_c [m/min]	25	45	65
f [mm/volta]	0,07	0,11	0,15
q [l/h]	1,5	2,0	2,5

Utilizando o *software* Minitab® 17 foi gerada a matriz de experimento, respeitando uma sequência aleatória e considerando as combinações dos fatores conforme a metodologia do BBD, totalizando 15 testes. Para tanto foram executados os furos com as duas condições de lubrificação. A mesma se encontra detalhada na Tabela 3.3. Os testes indicados com um asterisco (*) correspondem ao ponto central dos níveis dos fatores.

Tabela 3.3 – Matriz de experimentos Box-Behnken para as condições RQL e RQL+MLG

Teste	Fatores		
	v_c [m/min]	f [mm/volta]	q [l/h]
1	25	0,11	1,5
2	25	0,11	2,5
3	45	0,15	2,5
4	45	0,07	2,5
5	25	0,07	2,0
6*	45	0,11	2,0
7	65	0,15	2,0
8	65	0,11	1,5
9	45	0,07	1,5
10	45	0,15	1,5
11	65	0,11	2,5
12*	45	0,11	2,0
13	65	0,07	2,0
14*	45	0,11	2,0
15	25	0,15	2,0

Os testes executados na condição de fluido de corte em abundância foram realizados com a intenção de que seus resultados representassem um padrão para a furação do aço inoxidável AISI 304 nas condições estudadas. Assim, não houve variação na vazão abundante; logo, foram considerados os fatores v_c e f e seus níveis (Tabela 3.2). Um planejamento fatorial completo 3^2 (dois fatores e três níveis) com o auxílio do *software* Minitab®17 foi realizado, gerando uma matriz de experimento com 9 testes e duas repetições. Na Tabela 3.4 tem-se a matriz gerada, juntamente com a equivalência dos testes realizados no projeto de Box-Behnken.

As variáveis dependentes de saída selecionadas para este estudo foram: a força de avanço e o momento tursor gerados durante o processo de furação; a rugosidade da superfície usinada; e os desvios dimensional e geométrico dos furos obtidos. Buscando entender as influências dos fatores (v_c , f e q) em relação a cada variável de saída, para as condições RQL

e RQL+MLG, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) dos valores médios medidos de cada teste com um nível de confiança de 95%, empregando o *software* Minitab®17.

Tabela 3.4 – Matriz de experimentos para a condição abundante.

Sequência de furação	Teste RQL e RQL+MLG	Fatores	
		v_c [m/min]	f [mm/volta]
1	1 / 2	25	0,11
2	3/10	45	0,15
3	4 / 9	45	0,07
4	5	25	0,07
5	6 / 12 / 14	45	0,11
6	7	65	0,15
7	8/11	65	0,11
8	13	65	0,07
9	15	25	0,15

Os gráficos dos efeitos principais e de suas interações foram gerados e analisados e, como complemento, realizou-se a análise da superfície de resposta por gráficos tridimensionais. Também foram analisados o coeficiente de determinação para cada variável de saída, e a relação dos seus valores observados com os valores estimados pelo modelo de regressão empregado. Para a comparação das três condições lubrificantes, optou-se por apresentar os valores médios dos resultados em gráficos de colunas para facilitar a visualização e comparação.

3.9 Registros complementares

Para auxiliar na análise dos resultados, os cavacos produzidos durante a experimentação das três condições lubrificantes tiveram suas imagens registradas. Os desgastes das arestas de corte da ferramenta também foram acompanhados, sendo armazenada uma imagem superior da broca ao final de cada furo. As imagens foram feitas pelo microscópio digital USB Dino-Lite Pro modelo AM 413ZT (LAUS/UFRGS).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios medidos das variáveis respostas, em função das combinações dos parâmetros de corte empregados e para as condições de lubrificação RQL e RQL+MLG estão apresentados nos Apêndices A e B, respectivamente, sendo analisados a seguir. Em relação aos resultados obtidos com os furos realizados com lubrificação em abundância, que estão no Apêndice C, não são discutidos individualmente por não ser esse o objetivo deste trabalho. Estes resultados servem apenas para comparação das variáveis resultantes com as outras duas condições por serem resultados que refletem, de certo modo, a resposta padrão quando da furação de aço inoxidável AISI 304 nas condições aplicadas.

Para cada variável resposta realizou-se a ANOVA avaliando a significância dos fatores, e considerando os efeitos lineares, quadráticos e as interações da equação de regressão (Equação 2.4). O cálculo do quadrado médio (QM) ocorreu através da divisão da soma dos quadrados pelo grau de liberdade para cada um dos fatores. O termo F resultou da divisão dos quadrados médios dos fatores pelos quadrados médios residuais, e representa a quantidade que cada fator tem de influência sobre a variável resposta. Na análise das tabelas simplificadas da ANOVA, que são exibidas no decorrer do capítulo, considera-se um fator estatisticamente significativo quando o seu valor-p apresenta resultado menor que 0,05 (5%) de modo que, quanto menor seu valor, maior a influência sobre a variável de saída. Também são informados os coeficientes de determinação (R^2) e a relação dos valores observados da variável resposta com os valores estimados pela equação de regressão empregada, que auxilia na verificação de adequação da mesma ao experimento realizado. Considera-se que, quanto mais próximo $R^2 = 1$ se apresenta, mais satisfatório é o modelo de regressão aplicado.

4.1 Análise das variáveis respostas para a condição RQL

Os resultados alcançados com a utilização de fluido integral sintético aplicado em quantidade reduzida estão exibidos neste item, sendo apresentados e discutidos a partir da análise de variância e dos gráficos dos efeitos principais e de interação entre os fatores, e também das superfícies de resposta tridimensionais.

4.1.1 Esforços de corte

A Tabela 4.1 apresenta de maneira resumida os resultados da ANOVA dos esforços de corte consequentes dos testes realizados com a condição RQL. Verifica-se que o fator que se

apresentou como o mais significativo foi o avanço (f), com uma contribuição de 82,43% sobre o valor da força de avanço (F_f) e de 74,02% sobre o resultado do momento torsor (M_t). Têm-se ainda como significativos, a vazão (q) para F_f , e a velocidade de corte (v_c) para M_t .

Tabela 4.1 – ANOVA dos esforços de corte na condição RQL.

Fator	Força de avanço				Momento torsor			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	987	0,12	0,746	0,03	3,3593	12,80	0,016	14,02
f	2624692	311,20	<0,001	82,43	17,7371	67,57	<0,001	74,02
q	363295	43,07	0,001	11,41	1,3343	5,08	0,074	5,57
$v_c \times v_c$	3595	0,43	0,543	0,11	0,0982	0,37	0,568	0,41
$f \times f$	2245	0,27	0,628	0,07	0,0588	0,22	0,656	0,25
$q \times q$	98297	11,65	0,019	3,09	0,0004	0,00	0,972	0,00
$v_c \times f$	7641	0,91	0,385	0,24	0,0464	0,18	0,691	0,19
$v_c \times q$	27589	3,27	0,130	0,87	0,0023	0,01	0,930	0,01
$f \times q$	11521	1,37	0,295	0,36	0,0004	0,00	0,971	0,00
Erro	8434	—	—	1,32	0,2625	—	—	5,48

Com a análise da Figura 4.1 verifica-se que os valores de R^2 indicam uma boa correlação entre os esforços de corte obtidos com o modelo proposto pelo projeto de experimentos BBD. Essa adequação se confirma com as comparações apresentadas pelos gráficos, ou seja, quanto mais próximos estão os pontos (valores observados) em relação à reta de referência (valores estimados), mais ajustado se encontra o modelo utilizado com os dados obtidos.

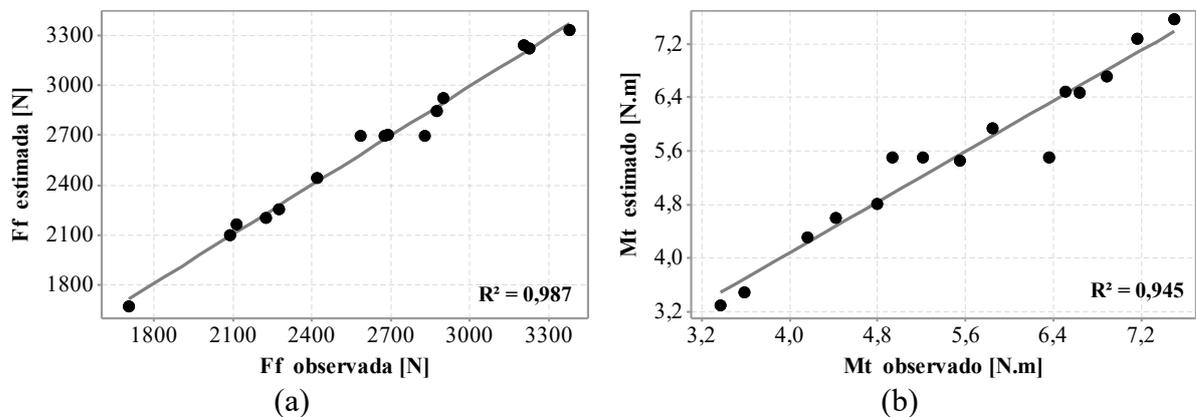


Figura 4.1 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para:

(a) F_f e (b) M_t .

Para entender o comportamento dos fatores individualmente, de acordo com a variação dos seus níveis em relação aos esforços de corte, apresenta-se a Figura 4.2. Com a análise dos gráficos, tem-se que f exerce influência direta sobre os mesmos. Vários estudos indicam que os esforços (F_f e M_t) aumentam com o aumento de f no processo de furação [Castillo, 2005; Camargo, 2008; Pinto, 2010; Diniz, 2013]. Um acréscimo de f leva a um aumento da espessura de corte (h), que ocasiona maiores quantidades de material a ser cisalhado, sendo então necessárias maiores forças no sentido de penetração da ferramenta.

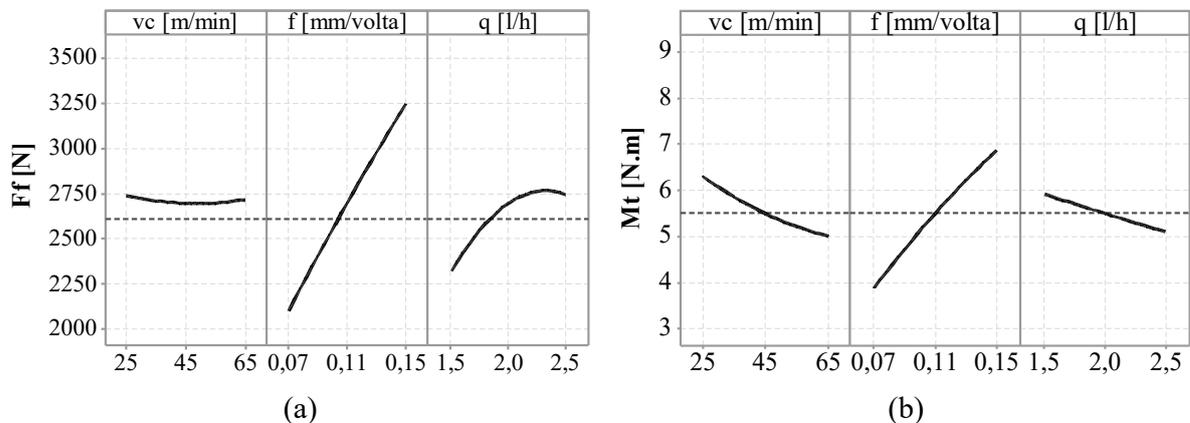


Figura 4.2 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL sobre: (a) F_f ; (b) M_t .

Conferindo o gráfico da Figura 4.2a, evidencia-se a ausência de significância de v_c , já que os valores médios resultantes da F_f , correspondentes a cada um dos seus níveis, ficaram próximos ao valor médio de 2612,56 N (linha média). Por outro lado, se visualiza uma variação significativa de F_f em relação à vazão do fluido lubrificador, com mais evidência entre 1,5 l/h e 2,0 l/h (efeito linear) do que entre 2,0 l/h e 2,5 l/h (efeito quadrático).

Analisando o M_t observa-se a influência de v_c (Tabela 4.1 e Figura 4.2b). O aumento desta de 25 para 65 m/min levou a uma redução de M_t . Utilizando o mesmo raciocínio do que já foi discutido, e baseando-se em Machado et al., 2015, tem-se que o aumento de v_c também causa aumento de temperatura, gerando redução da resistência ao cisalhamento do material e também das forças de corte. O estudo de Barbosa, 2014, também confirma o ocorrido, pois a autora verificou que o aumento da velocidade de corte teve o efeito de diminuição da deformação e da tensão de cisalhamento para a usinagem do aço inoxidável AISI 304. A vazão (q) apresentou o valor-p levemente significativo (0,074), com 5,73% de contribuição sobre M_t . Percebe-se que a utilização de uma maior quantidade de q gerou menores valores para M_t .

Provavelmente, esses valores não foram muito expressivos (próximos a 5,5 N.m) devido ao pouco efeito de lubrificação fornecida à zona de corte pela técnica RQL com aplicação externa.

Um acréscimo de material sendo removido aumenta a dureza e a resistência ao corte provocando a formação de um cavaco muito encruado que atrita com a superfície de saída da broca, elevando a temperatura na região [Vas et al., 2016]. Dois cavacos removidos com o maior valor de avanço utilizado nos testes ($f = 0,15$ mm/volta), apresentados na Figura 4.3, apresentam forma alongada, grande encruamento, dureza elevada e cor azulada que caracteriza alta temperatura (cerca de 350°C) durante a execução desses furos [Machado et al., 2015].

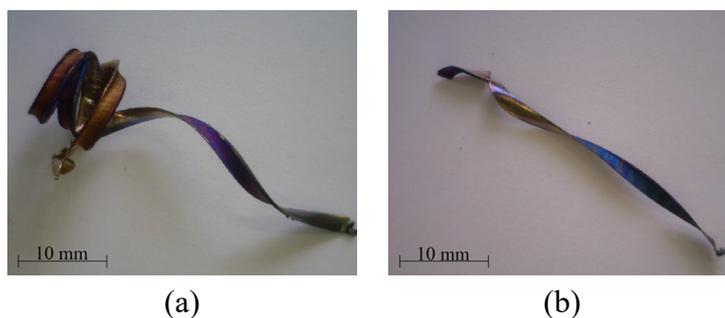


Figura 4.3 – Cavacos obtidos na condição RQL: (a) Teste 7 ($v_c = 65$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta, $q = 2,0$ l/h); (b) Teste 10 ($v_c = 45$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta, $q = 1,5$ l/h).

Acredita-se que a combinação do fluido de corte à base de água utilizado com o ar comprimido, quando em contato com a zona de corte, tenha produzido majoritariamente o efeito de refrigeração. A vazão $q = 1,5$ l/h seria insuficiente para fornecer qualquer efeito sobre a formação do cavaco por não conseguir alcançar o fundo do furo. Desse modo, o aumento da temperatura gerada pela falta de lubrificação/refrigeração, associada à baixa capacidade de condutividade térmica do AISI 304, levou a um aumento da sua ductilidade, promovendo um amolecimento do material e, conseqüentemente, um menor esforço necessário para a execução do corte [Barbosa, 2014]. Já as vazões $q = 2,0$ l/h e $q = 2,5$ l/h seriam suficientes para iniciar a refrigeração do corte, aumentando a resistência mecânica local, evitando o efeito positivo da elevação da temperatura sobre o material encruado. Como o fluido foi aplicado externamente à broca, houve a dificuldade de acesso do fluido à zona de corte (Figura 4.4).

A metodologia de superfície de resposta facilita a verificação gráfica do comportamento dos fatores e sua relação com as variáveis de saída. A Figura 4.5 apresenta as superfícies de resposta para a força de avanço (F_f) e o momento torsor (M_t).

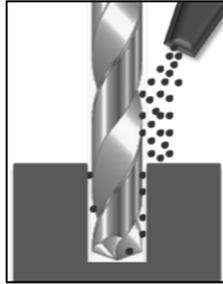


Figura 4.4 – Aplicação externa do fluido de corte com a técnica RQL.

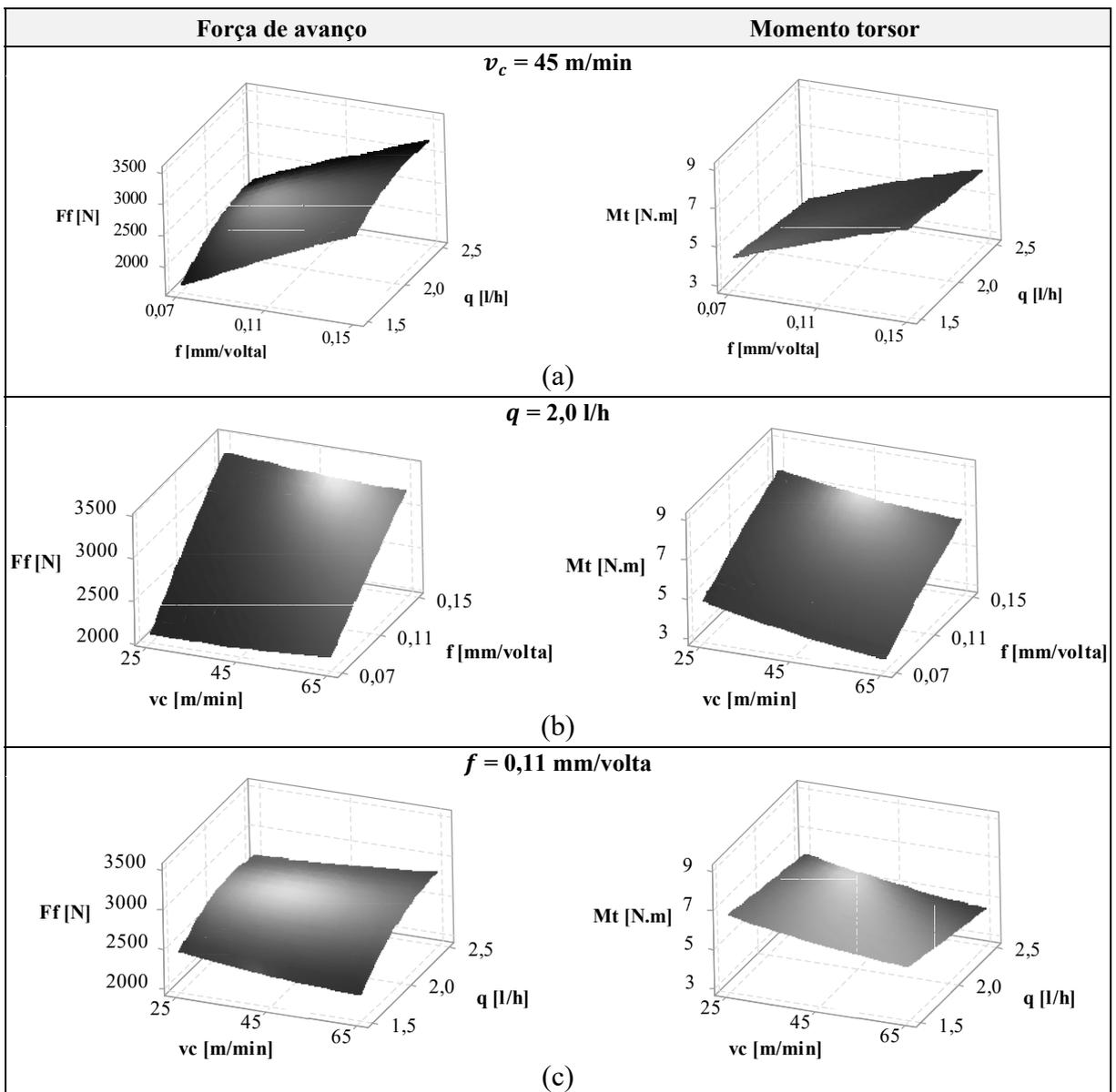


Figura 4.5 – Superfícies de resposta para F_f e M_t na condição RQL para: (a) $v_c = 45 \text{ m/min}$;

(b) $q = 2,0 \text{ l/h}$; e (c) $f = 0,11 \text{ mm/volta}$.

A força de avanço apresenta um ponto mínimo para a combinação dos fatores, $f = 0,07$ mm/volta e $q = 1,5$ l/h. Têm-se então baixos valores de F_f devido à menor quantidade de material sendo removida com o corte, facilitada pelas altas temperaturas resultantes de uma refrigeração e lubrificação praticamente ausentes, e com influência insignificante de v_c . O avanço apresenta um efeito linear em relação a F_f , tanto para a interação com q , quanto com v_c (Figura 4.5a e Figura 4.5b). Na Figura 4.5c visualiza-se o efeito quadrático de q sobre a variável resposta. Para o momento torsor, seu valor mínimo se encontra na combinação dos parâmetros $v_c = 65$ m/min e $f = 0,07$ mm/volta. Na superfície de resposta da Figura 4.5b, tem-se o efeito linear dos dois sobre a resposta. Neste caso, a minimização de M_t ocorre no corte com a menor remoção de material, facilitado pela diminuição da ductilidade pelo aumento da temperatura. A pequena parcela da influência de q sobre M_t aparece na sua interação com v_c (Figura 4.5c).

4.1.2 Rugosidade

O resultado simplificado da ANOVA dos parâmetros de rugosidade medidos nos furos usinados utilizando a condição RQL está na Tabela 4.2. Pela análise da variância pode-se verificar que a vazão se apresenta como fator significativo para os dois parâmetros, sendo o único para a rugosidade média (R_a) com 32,41% de contribuição sobre o seu resultado. Para a rugosidade total (R_t), tem-se que a interação entre a velocidade de corte e a vazão ($v_c \times q$) é significativa juntamente com o efeito quadrático do avanço (f), se apresentando como o fator de maior contribuição sobre o resultado do parâmetro (34,12%).

Tabela 4.2 – ANOVA dos parâmetros de rugosidade na condição RQL.

Fator	R_a				R_t			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	0,0048	0,04	0,845	0,16	0,0255	0,00	0,958	0,01
f	0,0188	0,17	0,699	0,63	3,8411	0,47	0,524	1,39
q	0,9730	8,67	0,032	32,41	56,5605	6,89	0,047	20,43
$v_c \times v_c$	0,0009	0,01	0,933	0,03	0,0596	0,01	0,935	0,02
$f \times f$	0,4975	4,43	0,089	16,57	94,4430	11,51	0,019	34,12
$q \times q$	0,2127	1,89	0,227	7,08	12,5517	1,53	0,271	4,53
$v_c \times f$	0,0006	0,01	0,943	0,02	0,5029	0,06	0,814	0,18
$v_c \times q$	0,5390	4,80	0,080	17,95	55,4777	6,76	0,048	20,04
$f \times q$	0,1400	1,25	0,315	4,66	5,9495	0,73	0,433	2,15
Erro	0,1122	—	—	18,69	8,2043	—	—	14,82

Os valores de R^2 indicam uma correlação adequada entre os parâmetros de rugosidade medidos com a equação de regressão utilizada, e dispersão entre os valores estimados e os observados aparecem na Figura 4.6. Isso ocorre devido à presença do erro experimental nos efeitos dos fatores sobre as variáveis resposta, com maior efetividade para R_a .

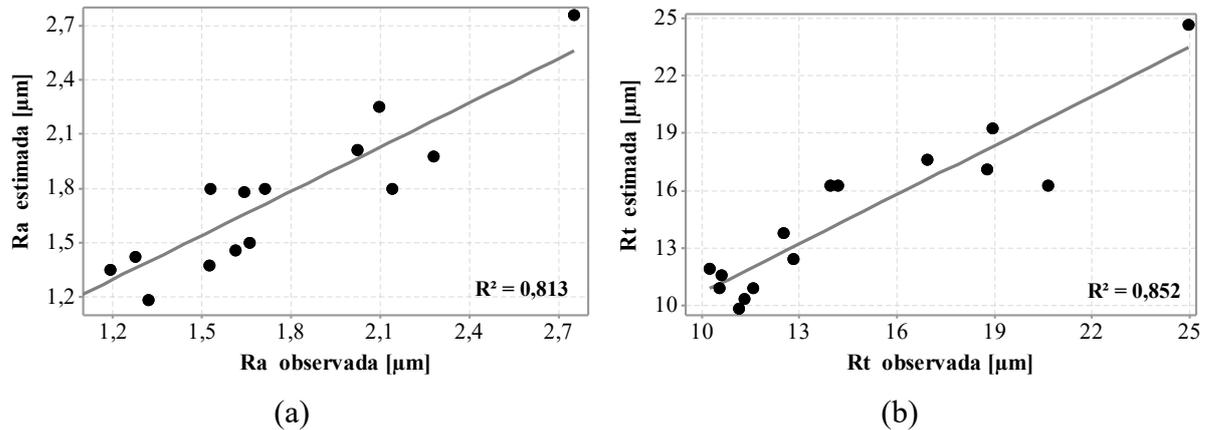


Figura 4.6 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para:

(a) R_a e (b) R_t .

Analisando os efeitos principais dos fatores, que podem ser vistos na Figura 4.7, tem-se que a vazão (q) afeta diretamente os valores de rugosidade mantendo o mesmo comportamento para os dois parâmetros. Percebe-se que o aumento de $q = 2,0$ l/h para $q = 2,5$ l/h causou um considerável efeito sobre o valor médio da rugosidade, no sentido de aumentá-la.

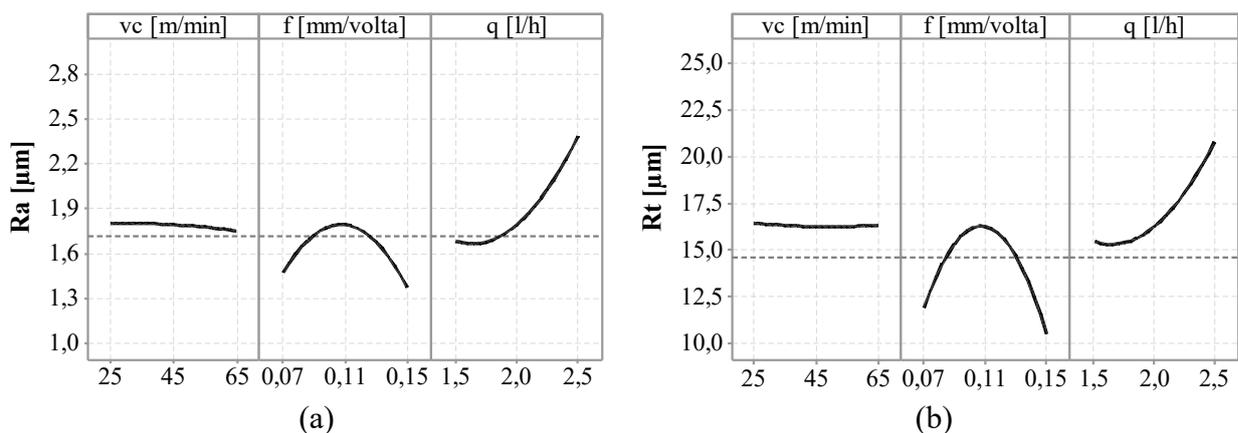


Figura 4.7 – Gráfico dos efeitos principais dos fatores na condição RQL sobre (a) R_a e (b) R_t .

Analisando os efeitos principais dos fatores sobre a rugosidade média (R_a), tem-se que a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) não são fatores significativos (Tabela 4.2). A v_c apresenta seus valores muito próximos do valor médio de R_a (1,72 μm) (Figura 4.7a).

O avanço, cujo efeito quadrático é significativo para a rugosidade total (R_t) (Tabela 4.2) e bem visível na Figura 4.7b, apresenta no seu nível intermediário utilizado, e indicado pelo fabricante da ferramenta, o maior valor médio de rugosidade. Enquanto isso, o maior valor de f (0,15 mm/volta) obteve o menor valor médio de R_t . Isso pode ser atribuído a uma maior facilidade na eliminação do cavaco, já que maiores avanços permitem que o corte alcance regiões ainda não tão endurecidas pelo processo, que apresentam menor encruamento e garantem melhor acabamento. Lima, 2008, também identificou a tendência de diminuição no valor da rugosidade com o aumento de f na furação do aço ABNT 4340.

Na Figura 4.8 tem-se uma montagem que auxilia no entendimento da influência da vazão sobre os parâmetros de rugosidade. São apresentadas as imagens da superfície usinada e os perfis de rugosidade obtidos nos Testes 1 e 2 que foram executados com os mesmos parâmetros de corte ($v_c = 25$ m/min e $f = 0,11$ mm/volta), mas, com diferentes vazões. A rugosidade obtida com $q = 1,5$ l/h (Teste 1) exibe menores variações em seu perfil, quando comparada com a rugosidade obtida com $q = 2,5$ l/h (Teste 2). Essas variações são caracterizadas pela presença de picos e vales muito acentuados em algumas regiões do perfil, provavelmente causados pela interação da ferramenta e do cavaco com as paredes do furo.

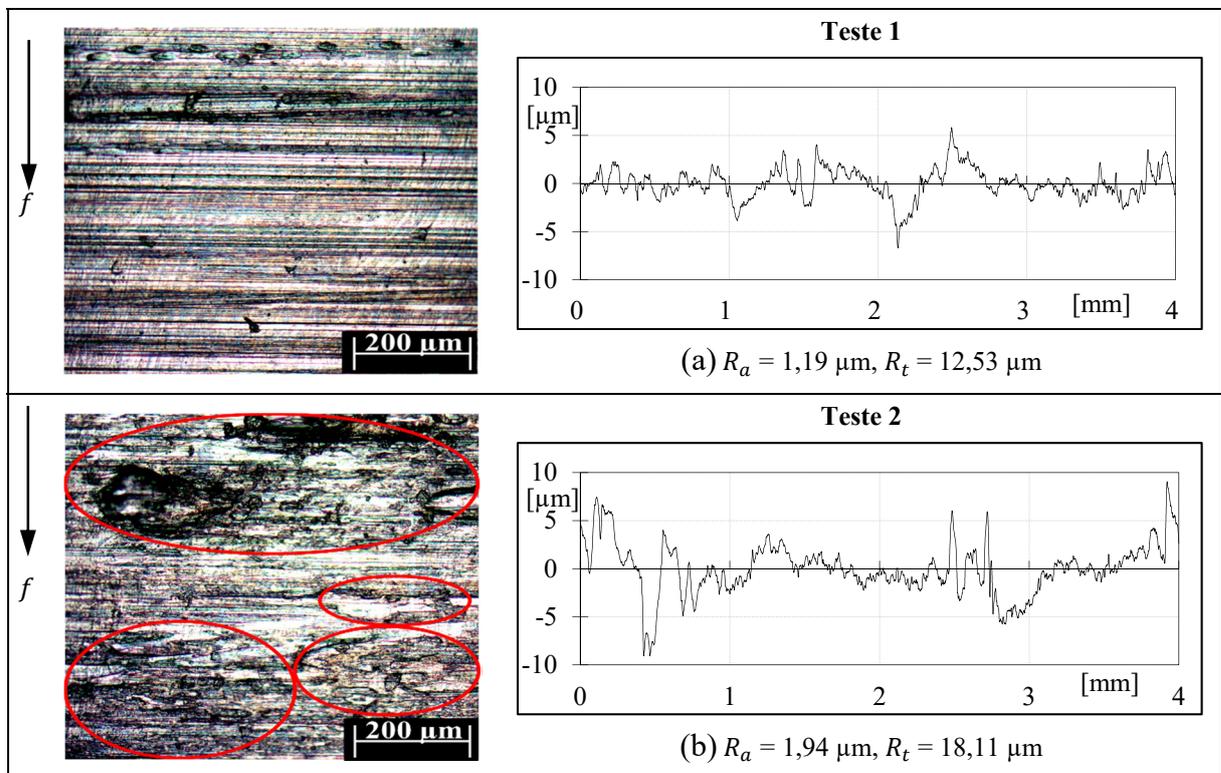


Figura 4.8 – Imagens da textura e perfis de rugosidade gerados na condição RQL:

(a) Teste 1 ($q = 1,5$ l/h); (b) Teste 2 ($q = 2,5$ l/h).

Para o Teste 1 as marcas de avanço são bem visíveis, transversais ao furo, causadas pela quina da broca. No caso do Teste 2, as variações são causadas principalmente pela presença de material aderido (caldeado), como indicado na Figura 4.8. Como dito anteriormente, o aço inoxidável austenítico tem a tendência de diminuir sua resistência ao cisalhamento quando em altas temperaturas, facilitando a remoção do cavaco, e gerando melhor acabamento da parede do furo. Acredita-se que na situação em que há maior presença de fluido (melhor condição de refrigeração), a resistência à formação do cavaco aumenta, produzindo maior caldeamento.

Em relação à R_t , tem-se também a interação significativa entre v_c e q (Figura 4.9b). Primeiramente, detecta-se certa constância do valor médio da rugosidade em função da variação da v_c , próxima ao valor médio de R_t (14,61 μm) para $q = 2,0$ l/h. Situação diferente para $q = 1,5$ l/h e $q = 2,5$ l/h que produzem valores crescentes e decrescentes, respectivamente, da rugosidade em função do aumento de v_c . Apesar de não serem significativos para um nível de significância de 5%, o efeito quadrático do avanço e a interação $v_c \times q$ apresentaram contribuições consideráveis sobre R_a (Tabela 4.2). A influência desses fatores sobre o comportamento de R_a ocorreu de maneira semelhante ao verificado para a rugosidade total (R_t), Figura 4.9a, de modo que as análises e discussões podem ser válidas para ambos os parâmetros.

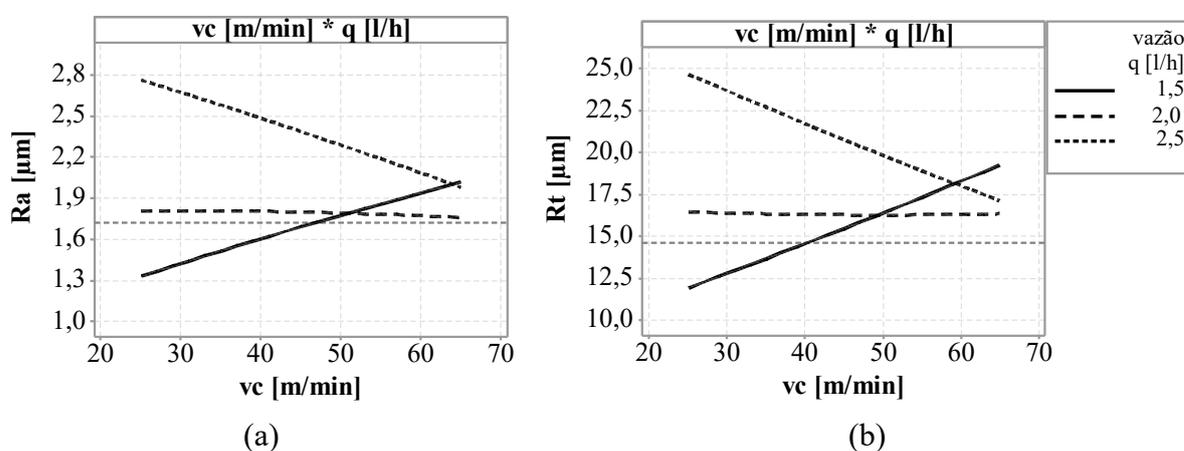


Figura 4.9 – Interação $v_c \times q$ na condição RQL sobre: (a) R_a ; (b) R_t .

Têm-se, então, as considerações que se seguem.

- À medida que v_c aumenta, mais calor é gerado na zona de corte suavizando o material da peça, o que, por sua vez, melhora a rugosidade da superfície [Rahim e Sasahara, 2011].
- A diminuição da rugosidade com o aumento de v_c pode ser também explicada pela diminuição da tendência à formação da aresta postiza de corte (APC). A presença de APC tende a ser a causa para um acabamento ruim na superfície usinada [Sultan et al., 2015a].

A Figura 4.10 mostra a textura das superfícies obtidas para as vazões $q = 1,5$ l/h e $q = 2,5$ l/h considerando diferentes velocidades de corte ($v_c = 25$ m/min e $v_c = 65$ m/min).

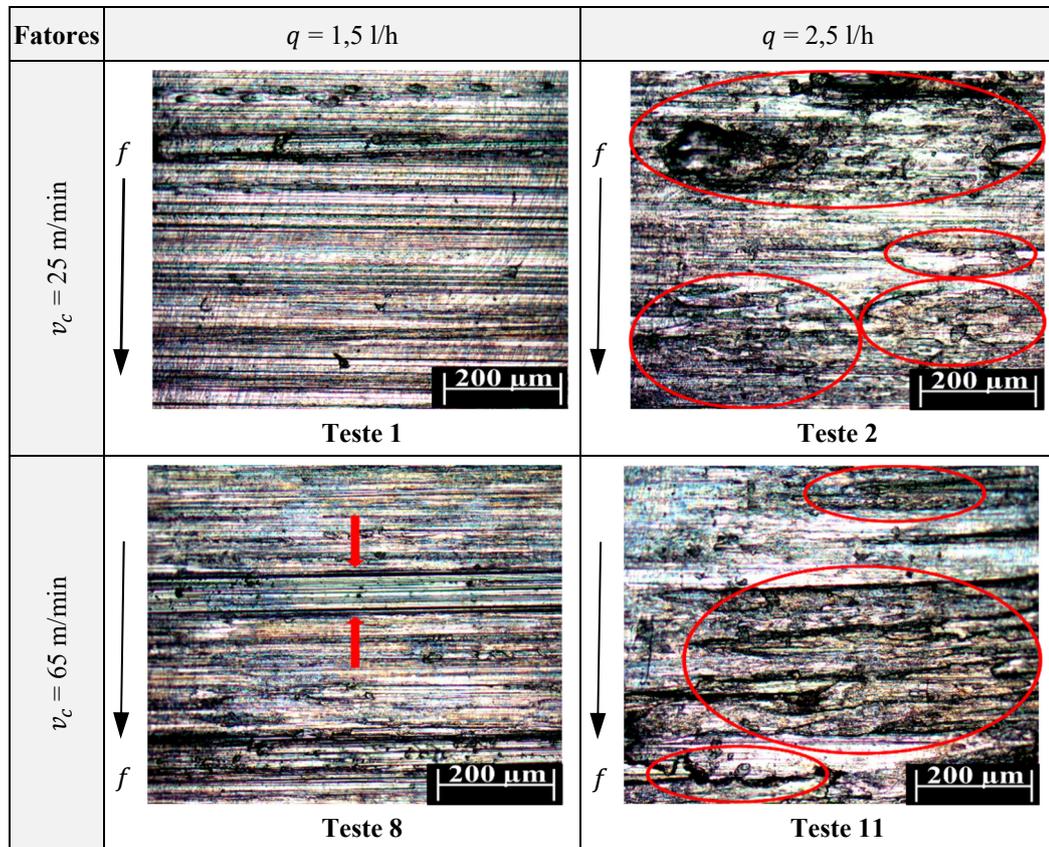


Figura 4.10 – Imagens das texturas das paredes dos furos para os testes com $f = 0,11$ mm/volta na condição RQL.

Para $q = 1,5$ l/h, que não apresentou efeitos sobre o processo como discutido para os esforços de corte, não houve dificuldades para a furação utilizando $v_c = 25$ m/min, de modo que a superfície obtida (Teste 1) apresenta predominantemente as marcas de avanço da ferramenta. Com o aumento da velocidade para $v_c = 65$ m/min, a formação do cavaco continua de maneira facilitada, mas o seu escoamento, devido à presença de pouco fluido, pode ter gerado muito atrito, principalmente com a parede do furo, formando grandes diferenças entre a altura dos picos e a profundidade dos vales. A imagem da textura do Teste 8 exemplifica a discussão ao apresentar marcas aparentemente mais profundas que podem ter sido geradas durante a extração do cavaco do furo. O aumento da rotação da broca, devido ao acréscimo de v_c , também pode ter causado um maior atrito da sua guia com a superfície usinada.

Para $q = 2,5$ l/h, uma maior presença do fluido forneceria certa refrigeração que, quando combinada com $v_c = 25$ m/min que não produz altas temperaturas durante a furação, teria maior dificuldade no processo de formação, mas, não no escoamento do cavaco (lubrificação). Essa

combinação estaria suscetível a geração de uma superfície com maior valor de rugosidade, principalmente associada ao acúmulo de material aderido, exemplificado pela imagem da textura do Teste 2. O aumento de v_c facilita a retirada do cavaco, diminuindo a quantidade de material sobre a superfície usinada, como pode ser visto na imagem da textura do Teste 11.

A análise das superfícies de resposta auxilia a compreender que, nas condições utilizadas neste experimento, a vazão teve um efeito mandatório sobre o acabamento do furo, principalmente na sua interação com a velocidade de corte. Menores valores para R_a e R_t estão associados à utilização de $q = 1,5$ l/h com $f = 0,07$ mm/volta e $v_c = 25$ m/min (Figura 4.11).

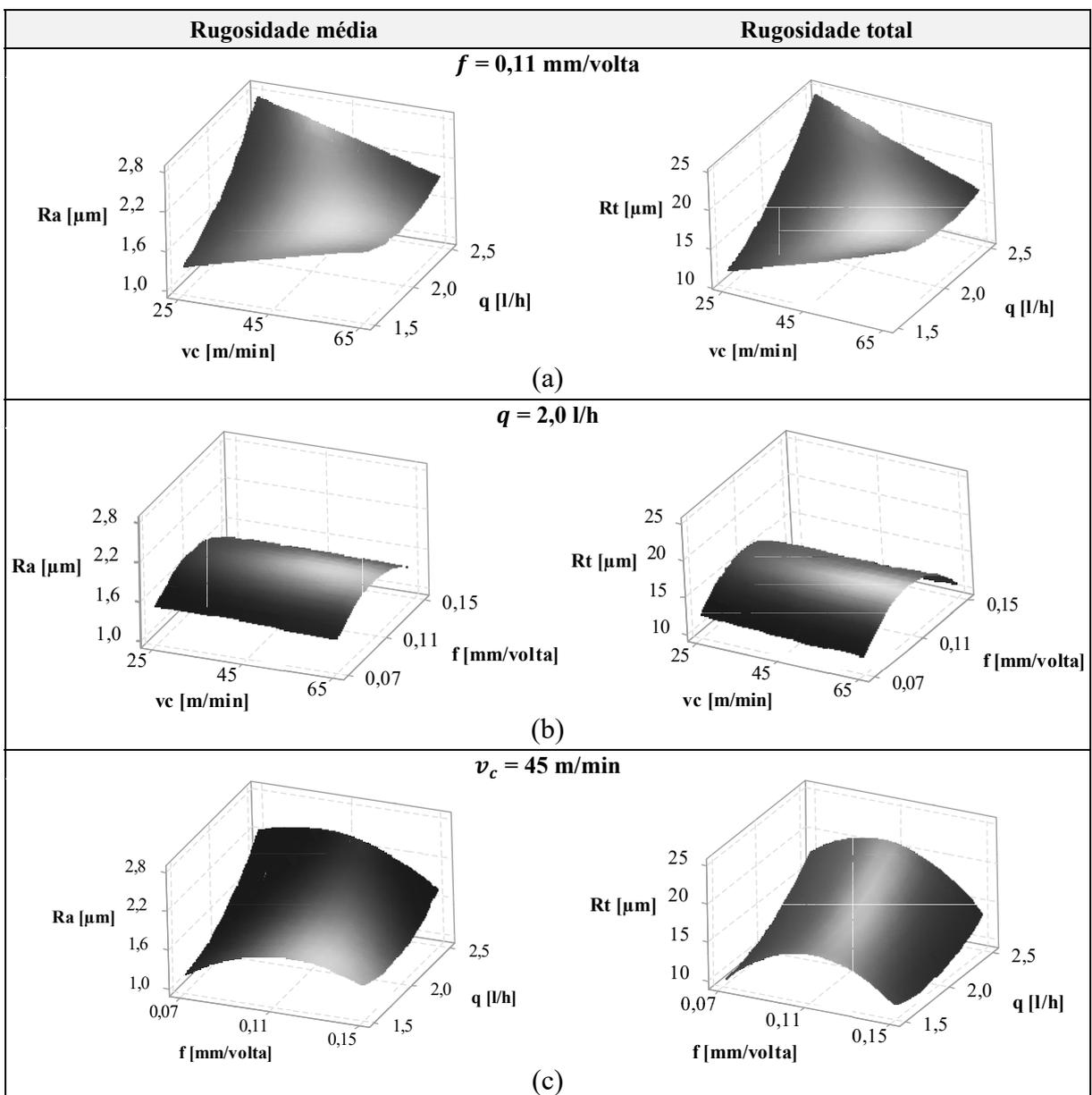


Figura 4.11 – Superfícies de resposta para R_a e R_t na condição RQL com:

(a) $f = 0,11$ mm/volta; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $v_c = 45$ m/min.

Tem-se então a formação de cavaco mais suave, possivelmente aproveitando a redução da resistência ao cisalhamento promovido pelo próprio aumento da temperatura do processo. Ao analisar apenas a relação entre os parâmetros de corte na Figura 4.11, verifica-se apenas a influência de f sobre o acabamento, não importando a v_c utilizada.

4.1.3 Desvio dimensional

A Tabela 4.3 apresenta o resultado simplificado da ANOVA do desvio dimensional ($d\phi$) para a entrada e a saída dos furos gerados com a utilização da condição RQL. Verifica-se que tanto para a entrada quanto para a saída dos furos a vazão (q) foi o único fator que apresentou significância. Verificando os coeficientes de determinação e a relação dos valores observados com os estimados (Figura 4.12) vê-se que, a ampla dispersão destes foi provocada pela grande presença do erro experimental, tendo maior evidência para o desvio dimensional na saída do furo, onde o erro apresenta 28,80% de contribuição sobre o seu resultado.

Tabela 4.3 – ANOVA do desvio dimensional na condição RQL.

Fator	Desvio dimensional ($d\phi$)							
	Entrada do furo ($d\phi_e$)				Saída do furo ($d\phi_s$)			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	344,53	0,71	0,438	2,80	0,76	0,01	0,937	0,04
f	1358,94	2,80	0,155	11,04	118,07	1,09	0,345	6,27
q	6431,67	13,24	0,015	52,24	959,22	8,85	0,031	50,97
$v_c \times v_c$	10,72	0,02	0,888	0,09	0,99	0,01	0,928	0,05
$f \times f$	846,07	1,74	0,244	6,87	112,31	1,04	0,355	5,97
$q \times q$	22,09	0,05	0,840	0,18	90,52	0,83	0,403	4,81
$v_c \times f$	148,84	0,31	0,604	1,21	2,01	0,02	0,897	0,11
$v_c \times q$	594,55	1,22	0,319	4,83	38,65	0,36	0,576	2,05
$f \times q$	118,08	0,24	0,643	0,96	0,42	0,00	0,953	0,02
Erro	485,94	—	—	19,74	108,43	—	—	28,80

Com a análise dos gráficos da Figura 4.13 percebe-se que o valor médio do desvio dimensional medido na entrada é maior do que na saída, $d\phi_e = 55,54 \mu\text{m}$ e $d\phi_s = 23,70 \mu\text{m}$, respectivamente. A variação de $d\phi$ está relacionada ao comportamento do material quando furado, de modo que, na entrada do furo há maior influência do efeito lubrificante do fluido de corte, enquanto que na saída, a influência se dá pela dilatação/contração do material. Esses diferentes valores de desvios também foi encontrado por Santana, 2015, e foi associado ao aumento da temperatura durante o processo de formação do cavaco que causaria dilatação

do material durante o seu corte, e depois a contração com o resfriamento. Esse efeito provavelmente teve maior impacto na região final da usinagem, já que no processo de furação a tendência é que a temperatura na região de corte vá aumentando com o a profundidade do furo e tem-se menor presença do fluido de corte [Uçak e Çiçek, 2018].

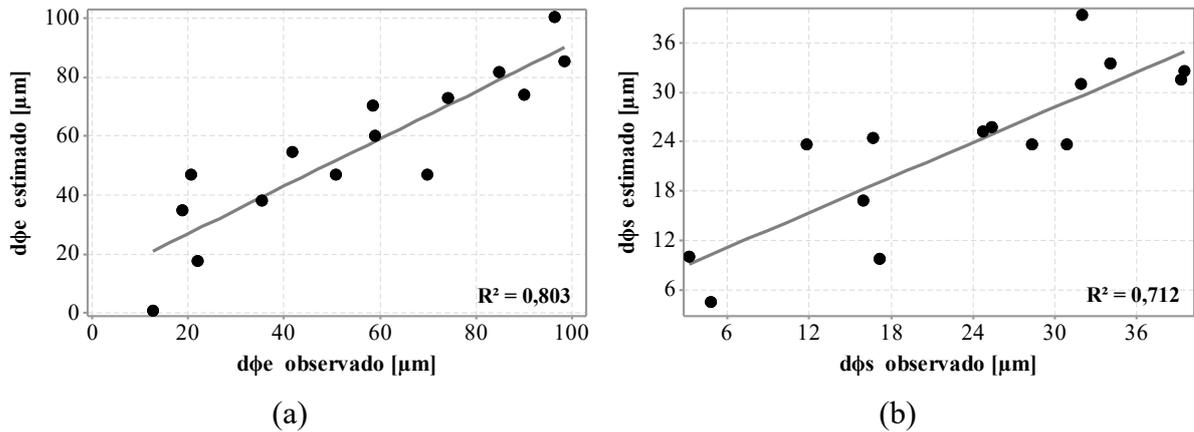


Figura 4.12 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para:

(a) $d\phi_e$; (b) $d\phi_s$.

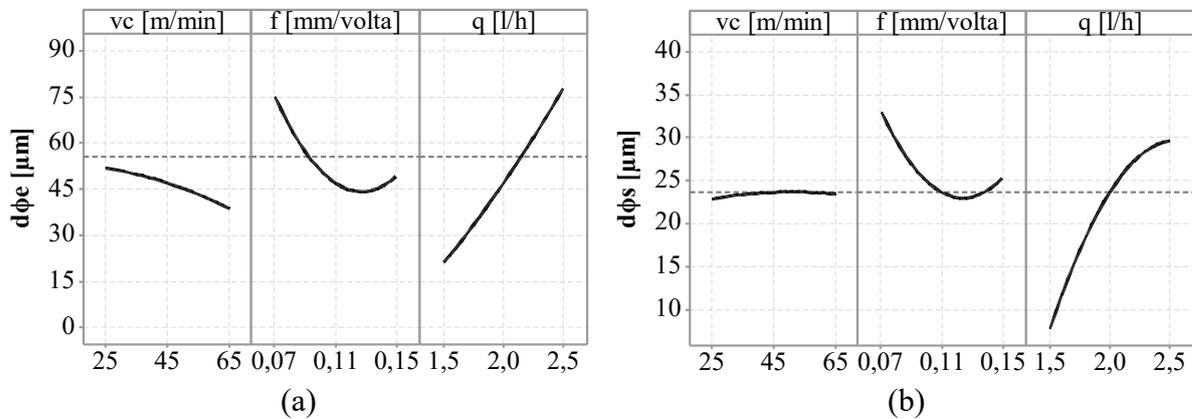


Figura 4.13 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL para: (a) $d\phi_e$; (b) $d\phi_s$.

A vazão q afetou $d\phi$ na entrada e na saída dos furos da mesma maneira, o seu aumento gerou acréscimos nos desvios. Para os furos usinados com $q = 1,5$ l/h, os menores valores de desvio em sua entrada devem-se a menor quantidade de fluido de corte que leva a uma menor refrigeração local. Assim como para a rugosidade, a formação facilitada do cavaco com a redução da resistência ao cisalhamento garantiu melhor acabamento dimensional. A utilização das vazões $q = 2,0$ l/h e $q = 2,5$ l/h, que provavelmente sofreram melhor nível de refrigeração, tiveram seus furos com maiores $d\phi_e$.

Pela Tabela 4.3, os fatores velocidade de corte (v_c) e avanço (f), não são significativos, exibindo valores médios com pouca variação, não tendo grandes contribuições sobre $d\phi$. Tem-se que o erro de batimento radial da broca utilizada na condição RQL foi de $10\ \mu\text{m}$, um valor considerado satisfatório de acordo com a tolerância apresentada pela norma DIN 6499 e inferior aos valores médios de $d\phi_e$ e $d\phi_s$. Logo, acredita-se que o mesmo não teve influência sobre $d\phi$.

Visualizando as superfícies de resposta na Figura 4.14 verifica-se o grande efeito linear que a vazão tem sobre $d\phi_e$ e $d\phi_s$.

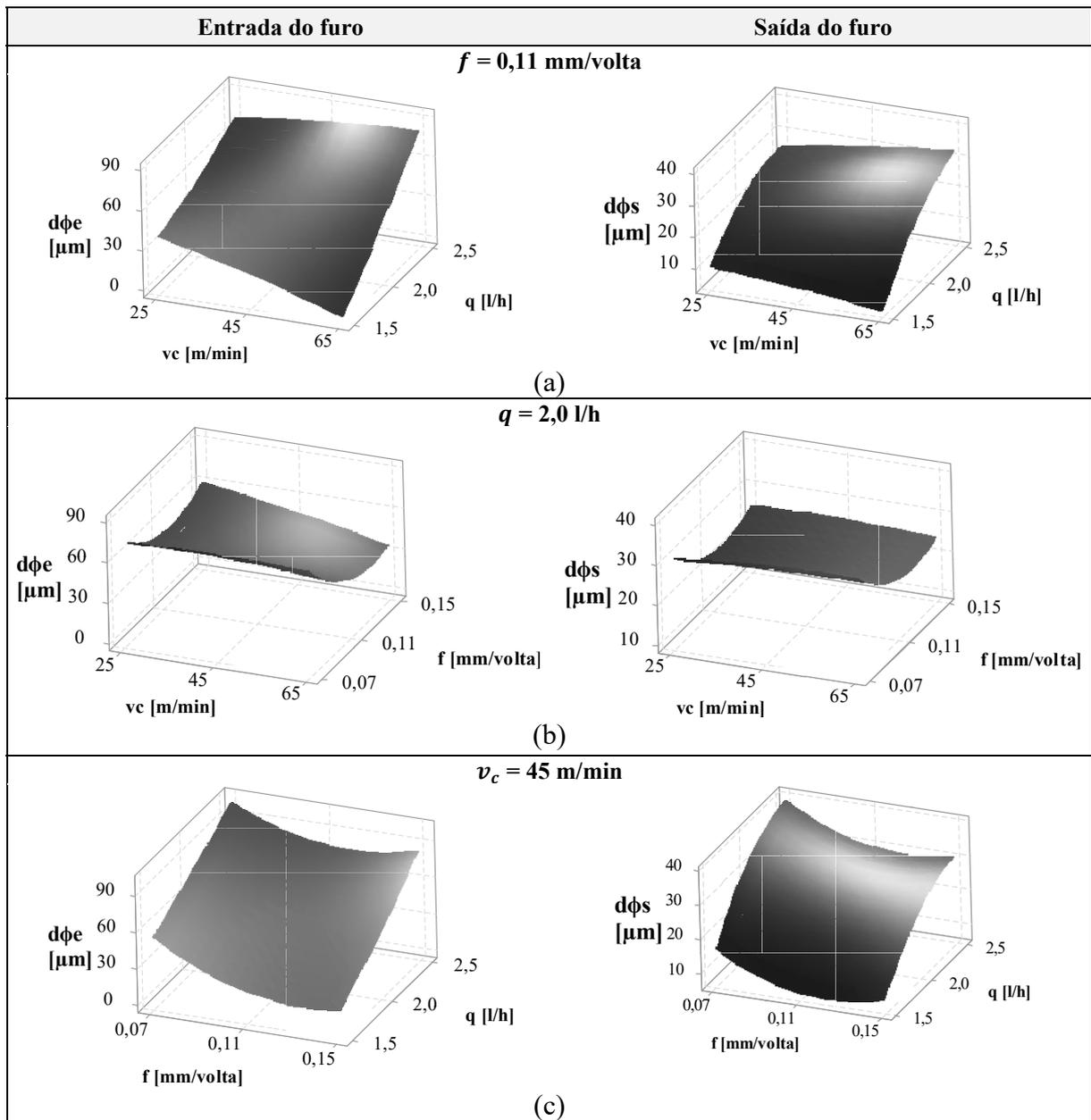


Figura 4.14 – Superfícies de resposta para $d\phi_e$ e $d\phi_s$ na condição RQL com:

(a) $f = 0,11\ \text{mm/volta}$; (b) $q = 2,0\ \text{l/h}$; (c) $v_c = 45\ \text{m/min}$.

O menor $d\phi$ está localizado na região que envolve a vazão $q = 1,5$ l/h e velocidade de corte $v_c = 65$ m/min (Figura 4.14a). Acredita-se que esta seria uma condição muito favorável para altos valores de temperatura na região de corte. Na interação $q \times f$ (Figura 4.14c), essa região está na combinação, $q = 1,5$ l/h aplicado com avanço variando de $f = 0,11$ mm/volta a $f = 0,15$ mm/volta. Tem-se então condições mais favoráveis de usinagem, como cavaco sendo formado a partir de regiões ainda não endurecidas pelo processo. A interação dos parâmetros de corte não apresenta comportamento expressivo, estando mais evidente essa falta de significância no valor de $d\phi_s$ (Figura 4.14b).

4.1.4 Desvio de circularidade

O resultado da ANOVA para o desvio de circularidade (dO) obtido na condição RQL, está na Tabela 4.4. Para a entrada do furo, as interações $q \times v_c$ e $q \times f$ foram significativas, com uma contribuição de 31,23% e 25,06%, respectivamente, sobre o desvio de circularidade na entrada do furo (dO_e). Para o desvio na saída (dO_s), a dispersão dos dados não permitiu afirmar, dentro de um intervalo de confiança de 95%, que existiu diferença entre os fatores.

Tabela 4.4 – ANOVA do desvio de circularidade na condição RQL.

Fator	Desvio de circularidade (dO)							
	Entrada do furo (dO_e)				Saída do furo (dO_s)			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	52,361	3,22	0,133	6,26	7,476	2,01	0,215	8,66
f	26,040	1,60	0,262	3,11	14,761	3,98	0,103	17,10
q	78,333	4,81	0,080	9,36	21,780	5,87	0,060	25,24
$v_c \times v_c$	3,362	0,21	0,669	0,40	1,244	0,34	0,588	1,44
$f \times f$	53,668	3,30	0,129	6,41	5,050	1,36	0,296	5,85
$q \times q$	47,080	2,89	0,150	5,63	2,479	0,67	0,451	2,87
$v_c \times f$	15,210	0,93	0,378	1,82	0,934	0,25	0,637	1,08
$v_c \times q$	261,361	16,05	0,010	31,23	2,250	0,61	0,471	2,61
$f \times q$	209,767	12,88	0,016	25,06	11,560	3,11	0,138	13,40
Erro	16,283	—	—	9,73	3,712	—	—	21,51

Apesar de seus valores-p estarem acima de 0,05, a vazão apresentou certa influência sobre dO_e e dO_s , principalmente em relação à saída (valor-p = 0,06 com contribuição de 25,24% sobre o resultado). Já para dO_e a contribuição foi de 9,36% (valor-p = 0,08).

Realizando a análise da Figura 4.15, tem-se um bom coeficiente de determinação para dO_e ($R^2 = 0,903$). Já para dO_s , alguns valores estimados entre 8 e 12 μm pela equação de

regressão apresentam dispersão em relação aos valores observados. Isso se deve à considerável contribuição do erro sobre esta variável de saída (Tabela 4.4), estando refletido também, no valor do seu coeficiente de determinação ($R^2 = 0,785$).

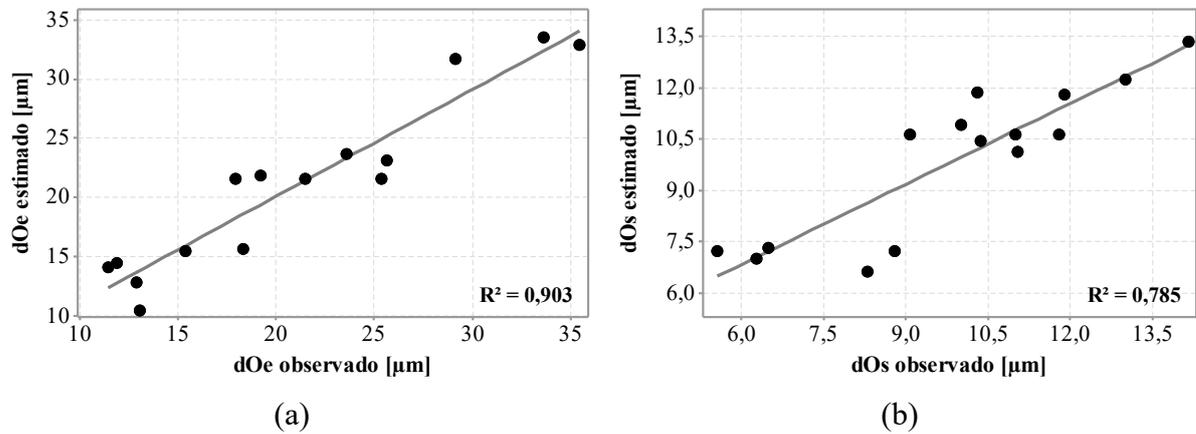


Figura 4.15 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL para: (a) dO_e ; (b) dO_s .

Com a análise dos gráficos da Figura 4.16, vê-se que o valor médio de circularidade medido na entrada é maior que na saída ($dO_e = 20,96 \mu\text{m}$ e $dO_s = 9,87 \mu\text{m}$, respectivamente). Acredita-se que essa diferença não está tão discrepante, como ocorreu com o desvio dimensional, devido à geometria da broca. Na Figura 4.16 também se percebe que dO_e e dO_s apresentam comportamento contrário com a presença de maior q . No início do furo, a presença do fluido de corte pôde ser mais sentida, de modo oposto à saída, em que a sua ausência produziu menores desvios. As possíveis instabilidades da broca no início do furo foram reduzidas, em relação ao apresentado na saída, pela geometria autocentrante da broca.

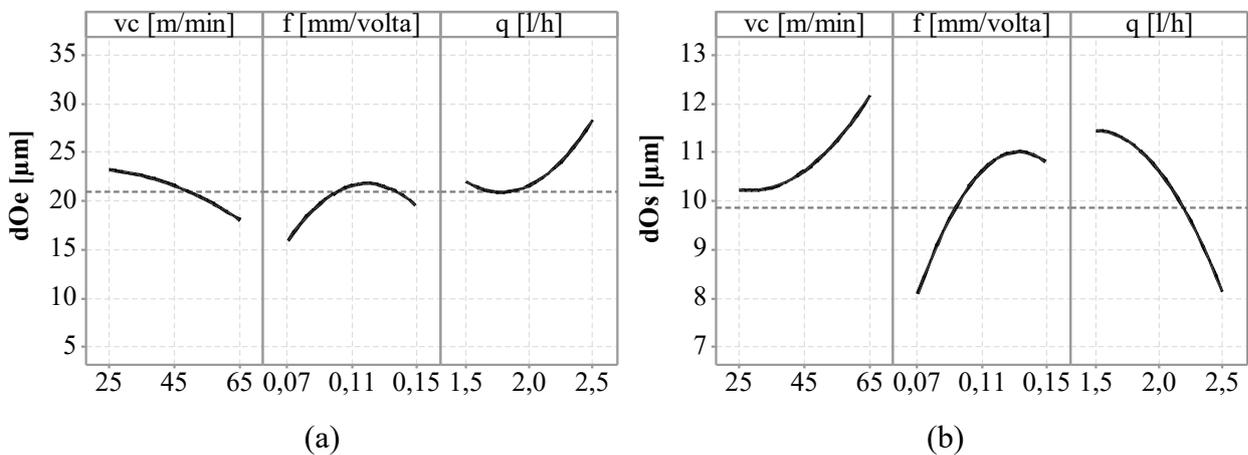


Figura 4.16 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL sobre: (a) dO_e ; (b) dO_s .

Na interação $v_c \times q$ para o desvio de circularidade na entrada do furo (dO_e), Figura 4.17a, verificaram-se dois comportamentos distintos com o aumento de v_c . O primeiro foi a diminuição de dO_e para as vazões $q = 1,5$ l/h e $q = 2,0$ l/h, sendo que para esta última, a variação foi menor, ficando próximo do valor médio de $20,96 \mu\text{m}$ (linha média). O segundo comportamento foi o aumento do desvio para $q = 2,5$ l/h. Tem-se que o aumento de v_c tende a aumentar os desvios do furo devido ao aumento da rotação do eixo da máquina-ferramenta, causando maiores vibrações durante o corte [Sultan et al., 2015a]. Provavelmente, o furo usinado com maior vazão ($2,5$ l/h), e consequentemente maior resistência à formação do cavaco, esteve mais suscetível às variações durante o corte como o aumento da vibração da broca, apresentando maior dO_e . Também já foi discutido que, para os fatores utilizados neste estudo, maior q resultou em maior R_a , que também poderia influenciar na leitura do desvio.

Na interação $f \times q$ (Figura 4.17b) também foi encontrado dois comportamentos do desvio de circularidade (dO_e). Para $q = 1,5$ l/h houve diminuição da variável resposta enquanto que, para $q = 2,0$ l/h e $q = 2,5$ l/h houve um aumento, com mais evidência para a maior vazão. Espera-se que as instabilidades da broca no início do corte tenham sido reduzidas pela sua geometria autocentrante; entretanto, o aumento de f gera maiores valores para a força de avanço podendo causar maior flambagem da broca, que aumenta os desvios dos furos. Dessa forma, os furos usinados com $q = 2,5$ l/h foram novamente mais suscetíveis às alterações do processo.

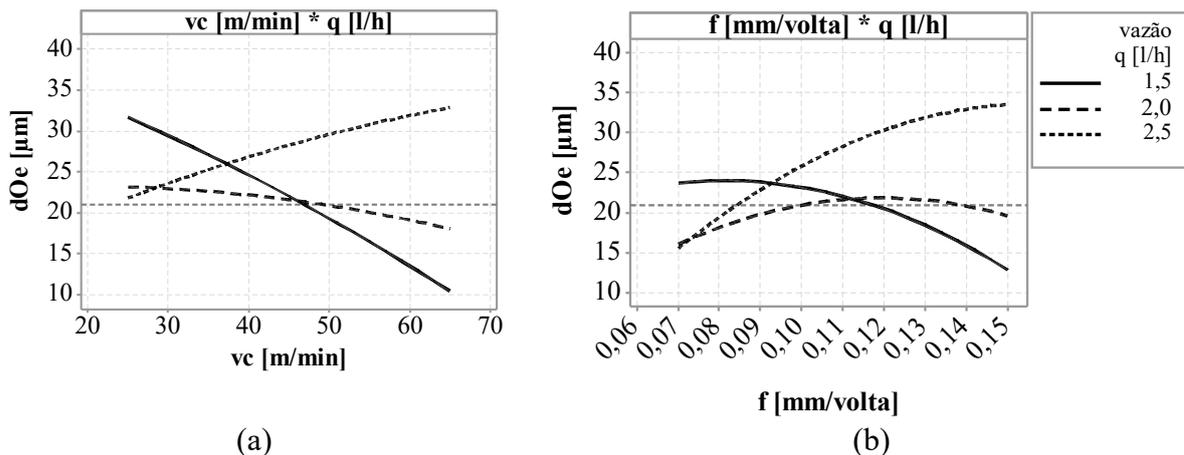


Figura 4.17 – Interações entre as variáveis de entrada sobre dO_e na condição RQL:

(a) $v_c \times q$; (b) $f \times q$.

Não há evidências de que o erro de batimento radial da broca utilizada (cerca de $10 \mu\text{m}$) tenha sido suficiente para gerar qualquer influência nos desvios de circularidade.

As superfícies de resposta para dO_e apresentam claramente o efeito linear da vazão interagindo com a velocidade de corte (Figura 4.18a) e com o avanço (Figura 4.18c). O ponto de menor valor do desvio está na combinação $v_c = 65$ m/min com $q = 1,5$ l/h, que assim como para o desvio dimensional ($d\phi$), provavelmente propicia a condição mais favorável para a geração de altas temperaturas. Essa condição também pode ser aplicada para $f = 0,15$ mm/volta com $q = 1,5$ l/h. A interação dos parâmetros de corte não apresenta comportamento expressivo para dO assim como ocorreu para $d\phi$ (Figura 4.18b).

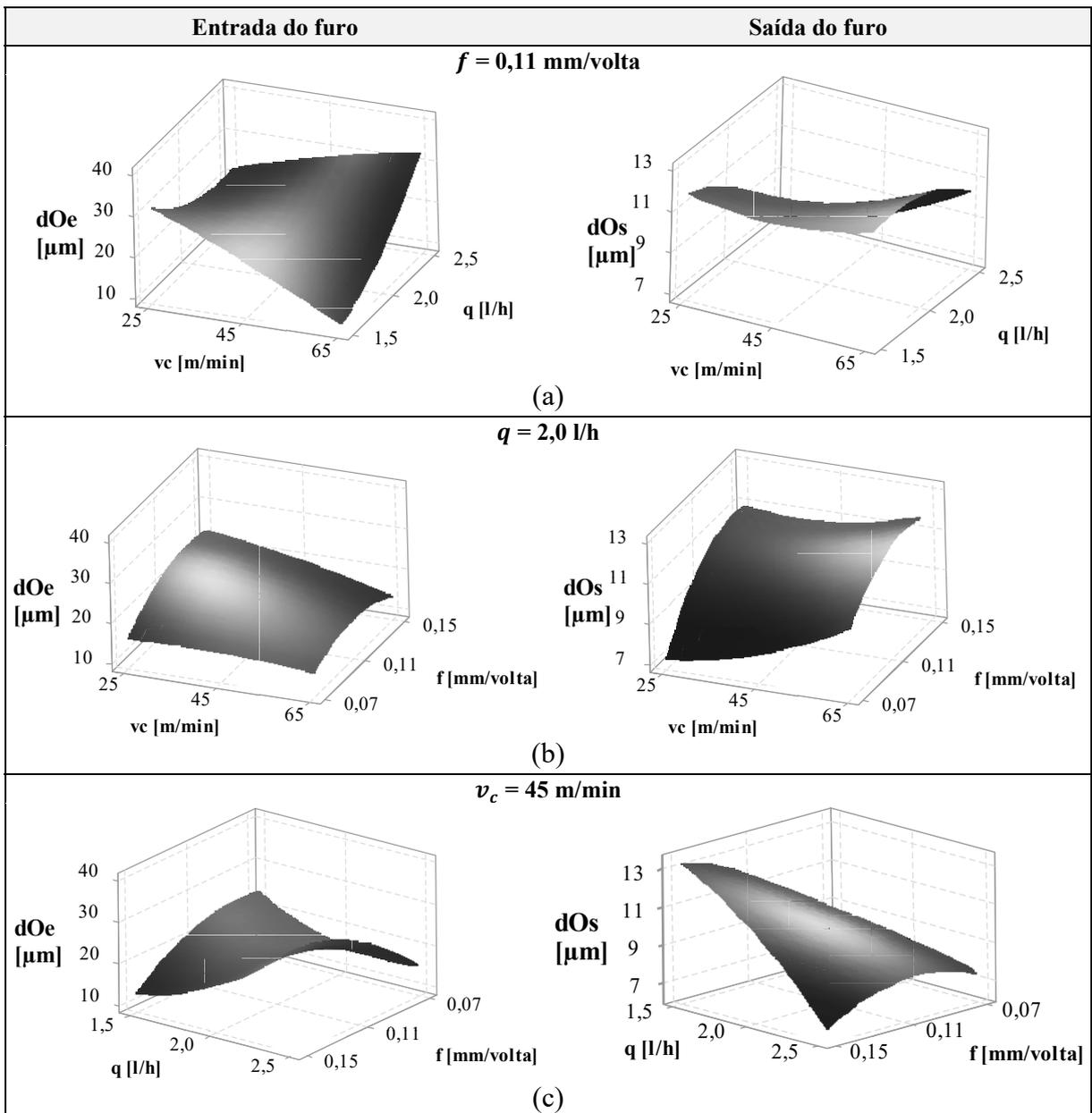


Figura 4.18 – Superfícies de resposta para dO_e e dO_s na condição RQL com:

(a) $f = 0,11$ mm/volta; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $v_c = 45$ m/min.

4.2 Análise das variáveis repostas para a condição RQL+MLG

Os resultados alcançados com a utilização de fluido integral sintético com adição de MLG em quantidade reduzida estão exibidos nos próximos subitens. Estes são apresentados e discutidos a partir da análise de variância e dos gráficos dos efeitos principais e de interação entre os fatores, e também das superfícies de resposta tridimensionais.

4.2.1 Esforços de corte

Na Tabela 4.5 tem-se a ANOVA para os esforços de corte resultantes da furação na condição RQL+MLG. Para a força de avanço (F_f) observam-se como significativos, a velocidade de corte (v_c) e a interação entre o avanço (f) e a vazão (q), possuindo respectivamente, 26,75% e 29,12% de influência sobre o resultado. Já para o momento torsor (M_t), nenhum fator individualmente foi significativo para um nível de significância de 5%. Foram verificadas duas interações significativas entre os fatores: $v_c \times q$, com 20,72% de contribuição sobre o resultado; e, $f \times q$, contribuindo com 22,86% do valor médio de M_t . Deve-se destacar a significância de q , a qual aparece nas interações com os parâmetros de corte em um comportamento diferente do que foi detectado na utilização da condição RQL. Possivelmente, isso reflete a influência da presença dos flocos de multicamadas de grafeno (MLG) sobre as variáveis repostas.

Tabela 4.5 – ANOVA dos esforços de corte na condição RQL+MLG.

Fator	Força de avanço				Momento torsor			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	602955	8,10	0,036	26,75	4,245	5,10	0,074	15,31
f	15923	0,21	0,663	0,71	0,236	0,28	0,618	0,85
q	21038	0,28	0,618	0,93	0,952	1,14	0,334	3,44
$v_c \times v_c$	260676	3,50	0,120	11,57	4,888	5,87	0,060	17,63
$f \times f$	625	0,01	0,931	0,03	0,804	0,97	0,371	2,90
$q \times q$	90508	1,22	0,320	4,02	0,028	0,03	0,862	0,10
$v_c \times f$	100999	1,36	0,297	4,48	0,008	0,01	0,927	0,03
$v_c \times q$	106952	1,44	0,284	4,75	5,746	6,90	0,047	20,72
$f \times q$	656359	8,82	0,031	29,12	6,339	7,61	0,040	22,86
Erro	74458	—	—	16,52	0,833	—	—	15,02

Na análise dos gráficos presentes na Figura 4.19 tem-se que, tanto F_f quanto M_t apresentam proximidade entre as dispersões dos seus valores adquiridos e os valores estimados nas equações de regressão, apresentando coeficientes de determinação satisfatórios.

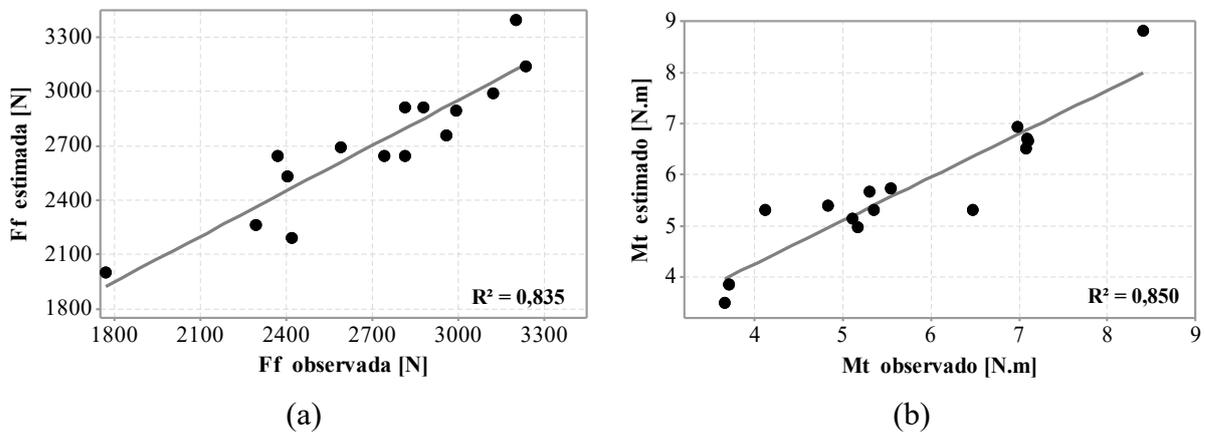


Figura 4.19 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) F_f ; (b) M_t .

Na Figura 4.20a têm-se os comportamentos dos efeitos principais dos fatores em relação à F_f . Pela análise do gráfico, verifica-se que o fator significativo velocidade de corte gera valores médios de F_f praticamente iguais para $v_c = 25$ m/min e $v_c = 45$ m/min (cerca de 2561 N). Destaca-se que esses resultados estão próximos aos gerados na condição RQL para todos os valores de v_c (próximos de 2612,56 N). O mesmo não ocorreu para $v_c = 65$ m/min. Acredita-se que essa maior velocidade de corte permitiu uma melhor atuação do fluido que, como já discutido, pode apresentar uma característica mais refrigerante no processo, dificultando o cisalhamento do material na formação do cavaco. Silva et al., 2015, verificaram que a adição dos flocos de MLG ao fluido de corte tornou mais eficiente o seu poder de refrigeração. Benedicto et al., 2017, esclarecem que o grafeno pode alterar a viscosidade e a condutividade térmica do fluido, aumentando-as. Tem-se ainda que, diferente do resultado alcançado pela condição RQL, o avanço (f) e a vazão (q) não foram significativos individualmente. A variação dos valores de F_f para cada um dos níveis destes fatores não possuem diferenças expressivas do valor médio (2707,64 N).

Ainda que a ANOVA não tenha resultado em nenhum fator significativo individualmente para o momento torsor (M_t), a Figura 4.20b apresenta o comportamento dos efeitos principais dos mesmos. Vê-se na Tabela 4.5, pelo valor-p, que a velocidade de corte (v_c) ficou muito próxima de ser significativa (valor-p = 0,074), destacando também o valor de

percentagem de contribuição que o fator teve sobre o resultado (tanto seu efeito linear quanto o quadrático, respectivamente 15,31% e 17,63%). Essa “quase significância” pode ser vista na Figura 4.20b, principalmente para $v_c = 65$ m/min que gerou um grande aumento sobre M_t , assim como o que aconteceu com F_f . Para os demais fatores (f e q), os valores de M_t ficaram próximos em relação ao valor médio de 5,73 N.m (linha média).

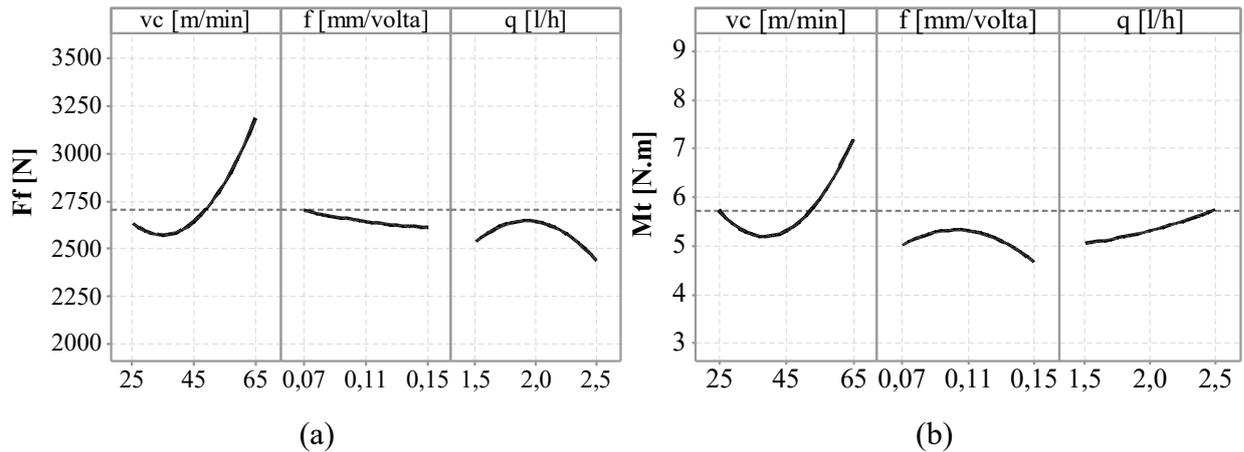


Figura 4.20 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre: (a) F_f ; (b) M_t .

Apesar de não serem individualmente significativos, f e q apresentaram interação significativa para F_f , que pode ser vista na Figura 4.21. Pela análise do gráfico destaca-se que, com a utilização de $f = 0,11$ mm/volta, os valores médios de F_f gerados para os diferentes níveis de q ficaram muito próximos. Isso pode ter ocorrido por este avanço ser o recomendado pelo fabricante da ferramenta, o que geraria uma furação mais estável. Percebe-se que as vazões $q = 1,5$ l/h e $q = 2,5$ l/h tiveram comportamentos diferentes com o aumento de f .

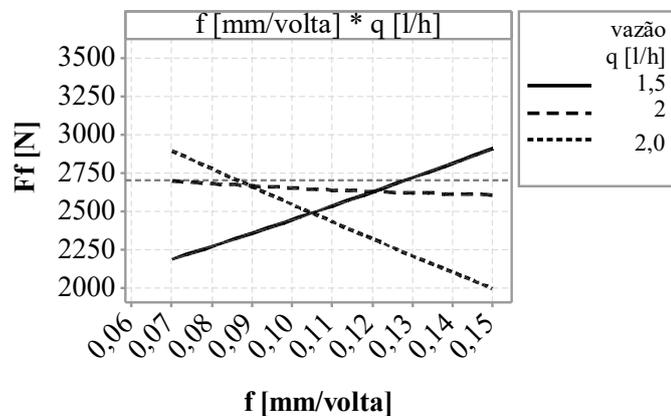


Figura 4.21 – Interação $f \times q$ na condição RQL+MLG sobre F_f .

Com a aplicação de fluido a $q = 1,5$ l/h, houve a necessidade de maiores forças para a remoção de uma maior quantidade de material. Isto ao contrário do que ocorreu para $q = 2,5$ l/h, em que o aumento de f gerou menores valores de F_f . Isso se explica pelo efeito refrigerante do fluido, e também da presença dos flocos de MLG, que podem ter agido como um lubrificante nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, diminuindo o atrito [Yi et al., 2017].

Através de uma avaliação visual de imagens das texturas das superfícies usinadas (Figura 4.22), para os mesmos parâmetros de corte, percebe-se menor caldeamento nos furos usinados com $q = 2,5$ l/h. Vê-se também destacados nas imagens alguns flocos de MLG aderidos às paredes dos furos.

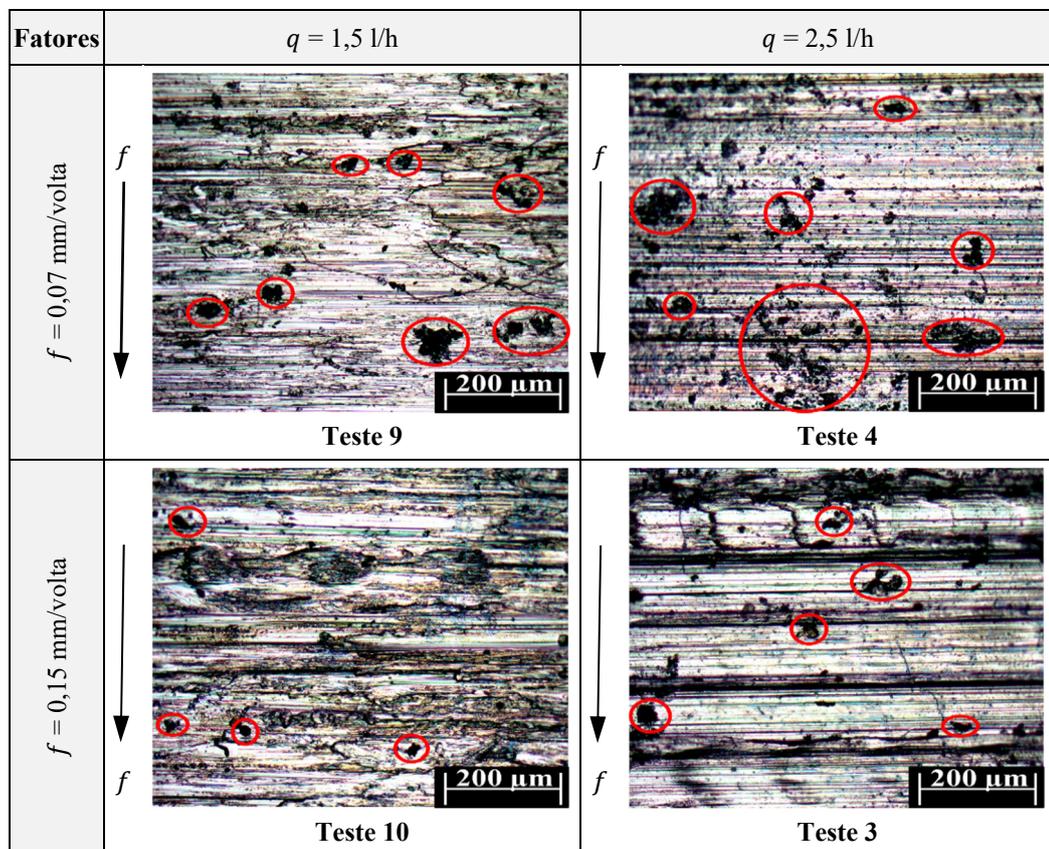


Figura 4.22 – Imagens da textura das paredes dos furos para os testes executados com $v_c = 45$ m/min na condição RQL+MLG.

A Figura 4.23a exibe a interação entre $v_c \times q$ em relação a M_t . Acredita-se que o comportamento para $q = 1,5$ l/h se assemelha ao discutido anteriormente, visto que, o aumento de v_c gera menores valores para M_t devido ao aumento da temperatura local, causando o “efeito de amolecimento” do material e facilitando o corte. Isto diferentemente para a vazão $q = 2,5$ l/h que, por ser maior, provocou um comportamento diferente na variável resposta. Pode ser que a quantidade de fluido aplicado, juntamente com os flocos de MLG, tenha sido suficiente para

resfriar o corte e dificultando-o. Essa dificuldade também pode ter sido sentida pela vazão $q = 2,0$ l/h, mas em uma menor intensidade justamente por a mesma ser um pouco reduzida. Destaca-se uma região próxima ao nível central de v_c , cerca de 40 m/min, em que o M_t tende a ter o mesmo comportamento independente da vazão q aplicada. Acredita-se também que é a partir desta região que o lubrificador aplicado começa a ter efeito sobre a zona de corte.

A interação $f \times q$ sobre M_t está na Figura 4.23b. O seu comportamento para $q = 1,5$ l/h continua sendo como o da literatura, em que se tem maiores valores de M_t com o aumento da quantidade de material cisalhado. Já para $q = 2,5$ l/h, assumindo que é fornecida uma quantidade de fluido suficiente para causar algum efeito de lubrificação, diz-se que houve maior facilidade para a formação e remoção do cavaco do furo. Assim como ocorrido para a F_f , os flocos de MLG podem ter auxiliado o fluido de corte a cumprir seu propósito.

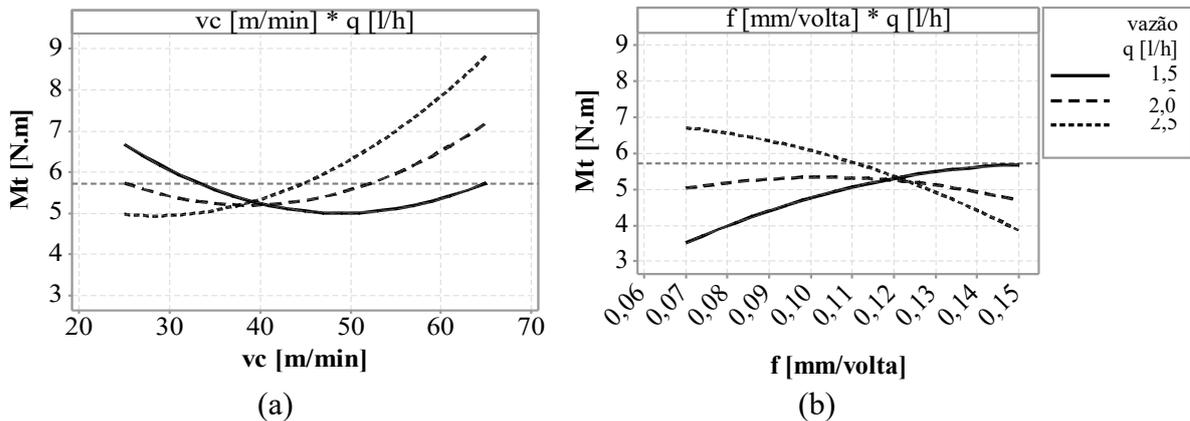


Figura 4.23 – Interações entre as variáveis de entrada sobre M_t na condição RQL+MLG:

(a) $v_c \times q$; (b) $f \times q$.

Analisando as superfícies de resposta, vê-se uma grande influência da interação $f \times q$ sobre F_f (Figura 4.24a). Menores valores podem ser encontrados tanto para a combinação $f = 0,07$ mm/volta e $q = 1,5$ l/h, quanto para $f = 0,15$ mm/volta e $q = 2,5$ l/h. Também é percebido que um menor valor de v_c associado com o maior q favorece a diminuição de F_f . O mesmo comportamento pode ser verificado nas superfícies de resposta apresentadas para M_t .

4.2.2 Rugosidade

Pela ANOVA pôde-se verificar que, para 95% de nível de confiança, não há fatores significantes sobre os parâmetros de rugosidade dos furos usinados na condição lubrificador RQL+MLG (Tabela 4.6).

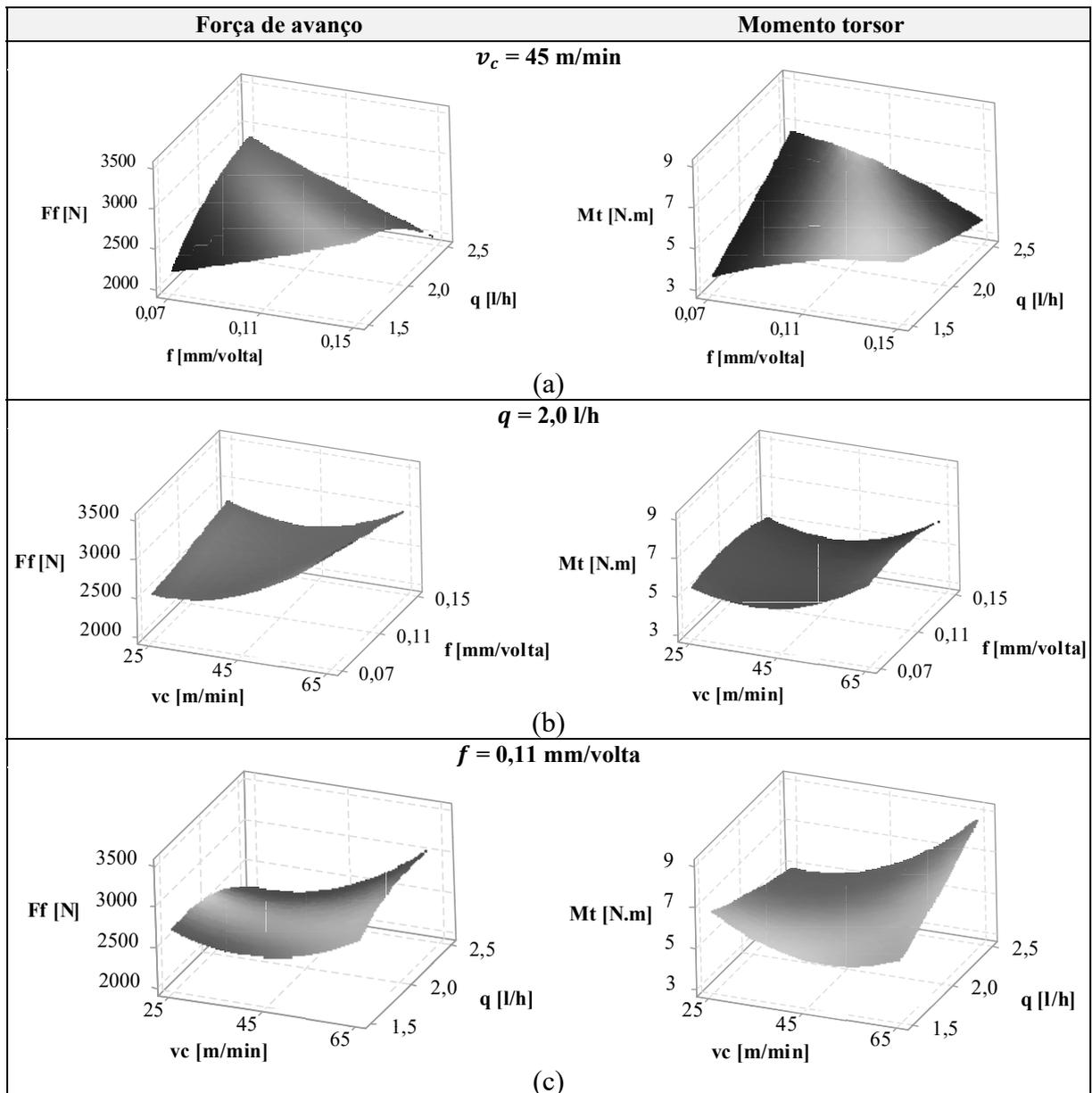


Figura 4.24 – Superfícies de resposta para F_f e M_t na condição RQL+MLG com:

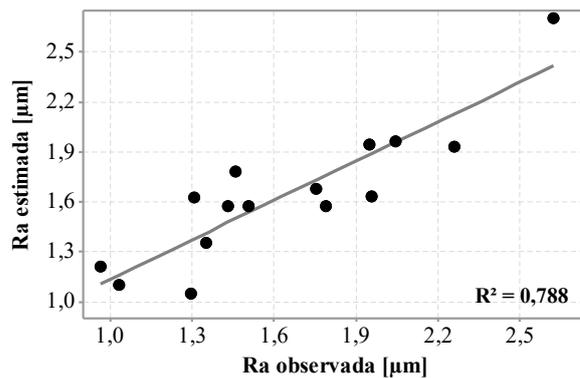
(a) $v_c = 45 \text{ m/min}$; (b) $q = 2,0 \text{ l/h}$; (c) $f = 0,11 \text{ mm/volta}$.

Foram verificadas contribuições consideráveis de falta de ajuste sobre os resultados da rugosidade média (R_a). Para a rugosidade total (R_t), todos os fatores apresentaram influência próxima de serem significativas que merecem ser discutidas.

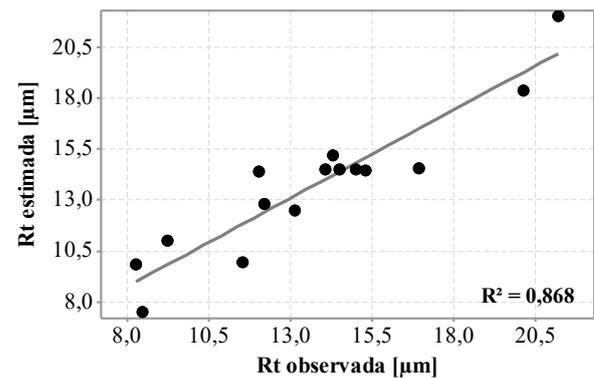
Com a análise da Figura 4.25 vê-se que os valores medidos dos parâmetros de rugosidade apresentam dispersões em relação aos valores estimados nas equações de regressão. Para R_a isto tem maior evidência, visto o seu menor valor de R^2 e a percentagem de contribuição do erro experimental sobre seus resultados que apresenta maiores valores que os dos fatores.

Tabela 4.6 – ANOVA dos parâmetros de rugosidade na condição RQL+MLG.

Fator	R_a				R_t			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	0,277	2,19	0,199	9,29	26,251	4,95	0,077	13,11
f	0,091	0,72	0,435	3,06	28,482	5,37	0,068	14,22
q	0,265	2,10	0,207	8,88	30,759	5,80	0,061	15,36
$v_c \times v_c$	0,027	0,21	0,664	0,90	0,078	0,01	0,908	0,04
$f \times f$	0,271	2,14	0,203	9,09	20,692	3,90	0,105	10,33
$q \times q$	0,383	3,03	0,142	12,86	2,255	0,43	0,543	1,13
$v_c \times f$	0,270	2,13	0,204	9,05	22,904	4,32	0,092	11,44
$v_c \times q$	0,495	3,92	0,105	16,60	31,192	5,88	0,060	15,57
$f \times q$	0,219	1,73	0,245	7,34	9,766	1,84	0,233	4,88
Erro	0,126	—	—	21,19	5,305	—	—	13,24



(a)



(b)

Figura 4.25 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) R_a ; (b) R_t .

Com a Figura 4.26 vê-se que o aumento da velocidade de corte (v_c) e do avanço (f) levam à diminuição de R_t , enquanto que, o acréscimo da vazão (q) leva a seu aumento. Este comportamento é semelhante ao encontrado na condição RQL. Com o uso de maiores valores de v_c e f , a formação do cavaco é facilitada devido ao efeito do amolecimento do material com a presença de maiores temperaturas, e o corte também se torna facilitado por ocorrer em regiões onde não há a presença de grande encruamento, garantindo bom acabamento. Já para a utilização de maior q , a refrigeração dificultaria o corte, prejudicando a textura da superfície.

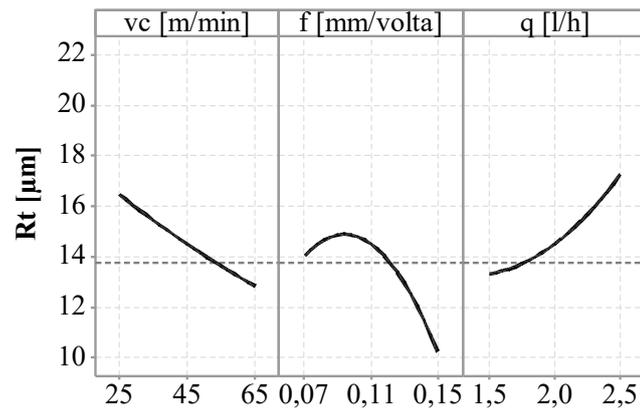


Figura 4.26 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre R_t .

As interações $v_c \times f$ e $v_c \times q$, também apresentaram “quase significância” sobre R_t (Figura 4.27). Para $v_c \times f$ (Figura 4.27a), o menor valor de rugosidade é alcançado com a combinação dos menores valores de avanço (0,07 e 0,11 mm/volta) associados às maiores v_c . Provavelmente, o material aquecido sendo removido em menores quantidades gera uma superfície usinada mais suave. Já para a interação $v_c \times q$ (Figura 4.27b), a utilização das vazões $q = 2$ l/h e $q = 2,5$ l/h (que provavelmente possuem maior efeito de lubrificação devido à presença de MLG), associadas a maiores v_c , apresentam melhor acabamento com valores de R_t inferiores ao da condição RQL. O efeito mandatório de v_c sobre R_t se reflete quando da utilização de 65 m/min, a variável de saída tende a apresentar valores muito próximos, diferentemente da vazão e do avanço (principalmente entre 0,07 e 0,15 mm/volta).

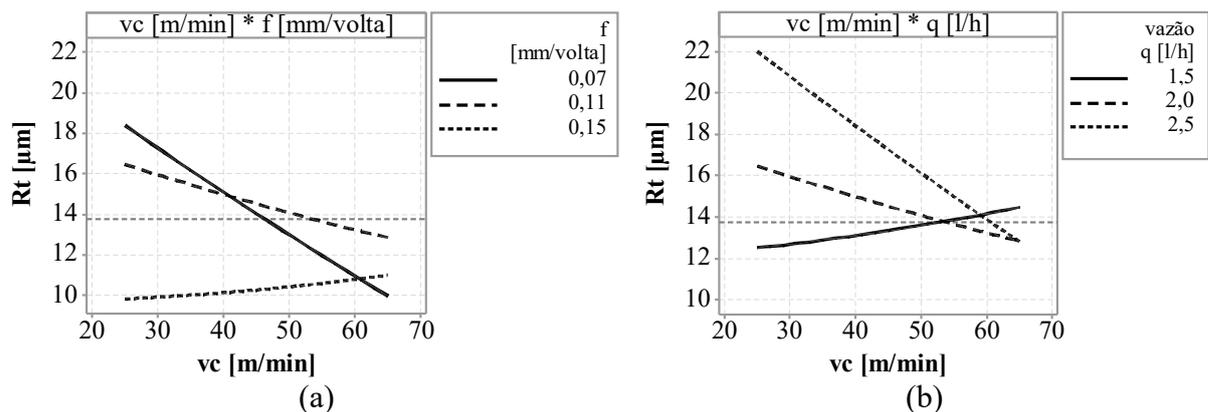


Figura 4.27 – Interações entre as variáveis de entrada sobre R_t na condição RQL+MLG:

(a) $v_c \times f$; (b) $v_c \times q$.

Nas superfícies de resposta para a rugosidade total (R_t), os seus menores valores estão associados à utilização de $f = 0,15$ mm/volta e $q = 1,5$ l/h (Figura 4.28a), independente de v_c utilizando o nível médio da velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min) (Figura 4.28b). Tem-se que a

formação do cavaco com o emprego do maior avanço gera menores valores de rugosidade, sem o auxílio do fluido lubrificante, e utilizando o nível médio da velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min). Os maiores valores de R_t são alcançados com $q = 2,5$ l/h e $v_c = 25$ m/min (Figura 4.28c), em que os efeitos do fluido de corte provavelmente levaram a uma maior quantidade de material aderido na superfície do furo. Logo, a menor rugosidade está associada à melhor formação e remoção do cavaco (menor atrito do cavaco com a parede do furo).

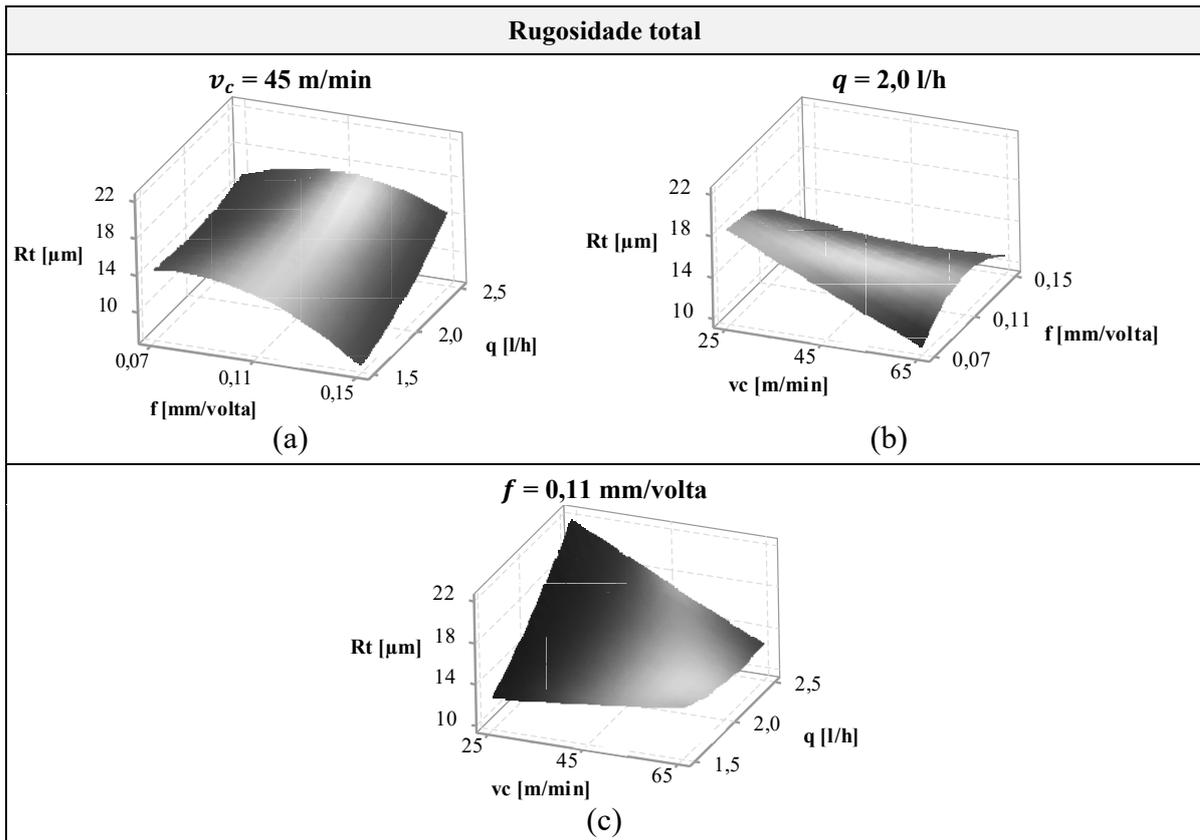


Figura 4.28 – Superfícies de resposta para R_t na condição RQL+MLG com:

(a) $v_c = 45$ m/min; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $f = 0,11$ mm/volta.

4.2.3 Desvio dimensional

Na ANOVA para o desvio dimensional na entrada do furo ($d\phi_e$) (Tabela 4.7) todos os fatores apresentaram significância, sendo v_c a maior com 41,05% de contribuição sobre o resultado. A interação de $q \times v_c$ também se apresentou significativa, contribuindo com 15,95% do valor médio de $d\phi_e$. Já para a saída do furo ($d\phi_s$), não houve significância de nenhum fator individualmente e nem das interações. Nesta variável resposta também pode se verificar a influência dos flocos de MLG, visto que, para a condição RQL apenas q teve significância sobre a dimensão do furo em sua entrada.

Tabela 4.7 – ANOVA do desvio dimensional na condição RQL+MLG.

Fator	Desvio dimensional ($d\phi$)							
	Entrada do furo ($d\phi_e$)				Saída do furo ($d\phi_s$)			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	4641,66	26,63	0,004	41,05	22,89	0,36	0,575	2,75
f	1517,09	8,70	0,032	13,42	6,48	0,10	0,763	0,78
q	1637,83	9,40	0,028	14,48	124,82	1,96	0,221	14,99
$v_c \times v_c$	650,82	3,73	0,111	5,76	27,11	0,42	0,543	3,26
$f \times f$	167,06	0,96	0,373	1,48	0,77	0,01	0,917	0,09
$q \times q$	8,14	0,05	0,837	0,07	161,18	2,52	0,173	19,35
$v_c \times f$	22,56	0,13	0,734	0,20	4,07	0,06	0,811	0,49
$v_c \times q$	1806,25	10,36	0,023	15,97	112,71	1,77	0,241	13,53
$f \times q$	39,27	0,23	0,655	0,35	42,90	0,67	0,450	5,15
Erro	174,31	—	—	7,71	63,84	—	—	38,33

Com a análise da Figura 4.29 verifica-se para $d\phi_s$ que a maioria dos seus valores estimados nas equações de regressão apresentam dispersão em relação aos seus valores obtidos. Vê-se na Tabela 4.7 que o erro experimental apresentou contribuição sobre o desvio dimensional na saída do furo maior que os fatores seleccionados para o experimento. O valor de R^2 reflete a dificuldade do modelo empregado em estimar essa variável de saída.

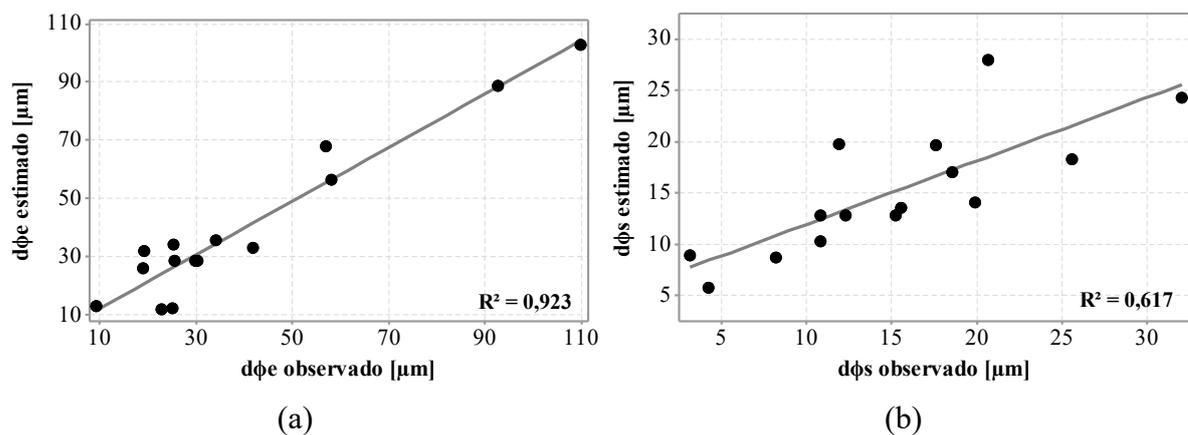


Figura 4.29 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) $d\phi_e$; (b) $d\phi_s$

A partir do gráfico da Figura 4.30 vê-se que tanto o aumento da velocidade de corte (v_c) quanto do avanço (f), resultou em menores valores para $d\phi_e$. O aumento dos valores dos parâmetros de corte gerou maiores valores de temperatura nas zonas de cisalhamento do material. Dessa forma, a formação do cavaco ocorreu de maneira mais facilitada devido ao

“amolecimento do material”, não prejudicando a dimensão do furo. Acredita-se que o erro de batimento radial da broca (cerca de $10\ \mu\text{m}$) não teve influência nos resultados dos desvios.

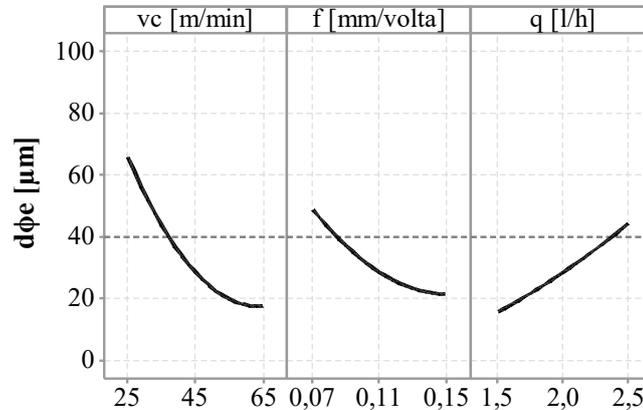


Figura 4.30 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre $d\phi_e$.

O aumento do desvio dimensional na entrada do furo ($d\phi_e$) com a utilização de maiores valores de vazão (q) ocorreu do mesmo modo que para a condição RQL. As vazões $q = 2,0\ \text{l/h}$ e $q = 2,5\ \text{l/h}$ possivelmente conseguiram refrigerar o início do furo, diminuindo a temperatura na região de corte e aumentando os valores dos desvios.

O gráfico da interação significativa (Figura 4.31) apresenta a redução de $d\phi_e$ com o aumento de v_c , para as vazões $q = 2,0\ \text{l/h}$ e $q = 2,5\ \text{l/h}$. A presença de maior refrigeração continua gerando acréscimos nos valores do desvio, mas, a presença dos flocos de MLG pode ter atuado como lubrificante nas interfaces da ferramenta, de maneira que a variável resposta foi se atenuando com o aumento de v_c . Para a vazão $q = 1,5\ \text{l/h}$, as alterações no desvio não foram expressivas, ficando abaixo do valor médio de $d\phi_e$, que é de $39,95\ \mu\text{m}$ (linha média).

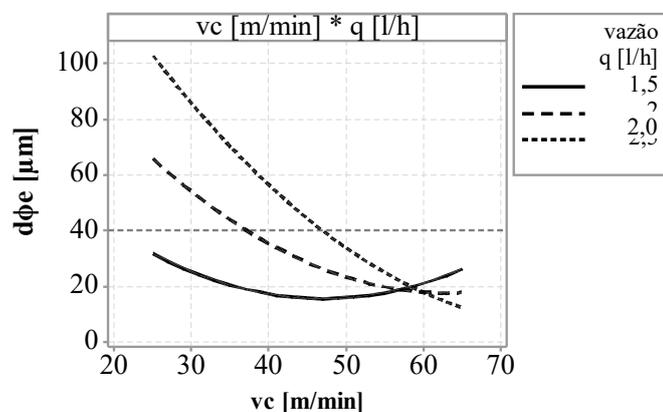


Figura 4.31 – Interação $v_c \times q$ na condição RQL+MLG sobre $d\phi_e$.

A partir da análise das superfícies de resposta (Figura 4.32) têm-se os menores valores dos desvios dimensionais $d\phi_e$ e $d\phi_s$ para as regiões que envolvem: $q = 1,5$ l/h e $f = 0,15$ mm/volta (Figura 4.32a); e, $v_c = 65$ m/min e $f = 0,15$ mm/volta (Figura 4.32b). Essas duas regiões apresentam as combinações que tendem a gerar as maiores temperaturas durante o corte. Pelo contrário, analisando a Figura 4.32c se verifica a combinação que apresenta a menor geração de calor e, conseqüentemente, os maiores valores dos desvios dimensionais: $v_c = 25$ m/min e $q = 2,5$ l/h.

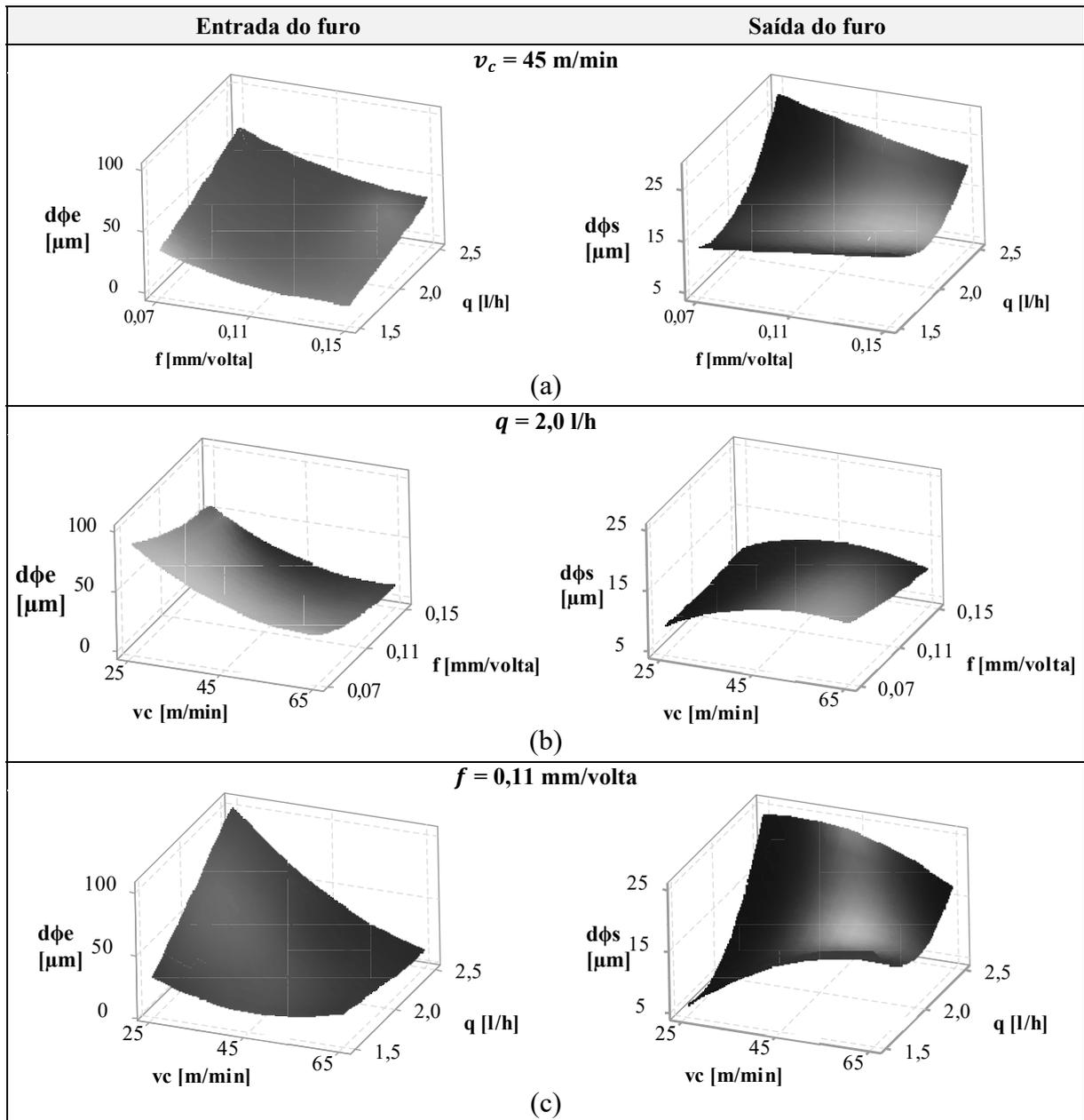


Figura 4.32 – Superfícies de resposta para $d\phi_e$ e $d\phi_s$ na condição RQL+MLG com:

(a) $v_c = 45$ m/min; (b) $q = 2,0$ l/h; (c) $f = 0,11$ mm/volta.

4.2.4 Desvio de circularidade

O resumo da ANOVA para o desvio de circularidade na entrada (dO_e) e na saída (dO_s) para a condição RQL+MLG está na Tabela 4.8. Para a entrada do furo, tem-se a velocidade de corte (v_c) como fator mais significativo (efeito quadrático), com 31,14% de contribuição sobre o resultado, não apresentado interação significativa. Para a saída do furo, o fator mais significativo foi a vazão (q), pois, somando seus efeitos linear e quadrático, possui uma contribuição de 53,06% sobre o valor do desvio.

Tabela 4.8 – ANOVA do desvio de circularidade na condição RQL+MLG.

Fator	Desvio de circularidade (dO)							
	Entrada do furo (dO_e)				Saída do furo (dO_s)			
	QM	F	Valor-p	% contribuição	QM	F	Valor-p	% contribuição
v_c	23,920	0,47	0,525	1,66	28,501	9,20	0,029	10,14
f	307,933	6,01	0,058	21,39	16,056	5,19	0,072	5,72
q	5,894	0,12	0,748	0,41	123,507	39,89	0,001	43,96
$v_c \times v_c$	448,350	8,75	0,032	31,14	2,274	0,73	0,431	0,81
$f \times f$	147,973	2,89	0,150	10,28	8,571	2,77	0,157	3,05
$q \times q$	170,175	3,32	0,128	11,82	25,577	8,26	0,035	9,10
$v_c \times f$	4,000	0,08	0,791	0,28	4,988	1,61	0,260	1,78
$v_c \times q$	8,314	0,16	0,704	0,58	2,200	0,71	0,438	0,78
$f \times q$	4,340	0,08	0,783	0,30	53,778	17,37	0,009	19,14
Erro	51,241	—	—	17,80	3,096	—	—	5,51

Na análise dos gráficos da Figura 4.33 verifica-se proximidade entre os desvios de circularidade medidos com os estimados nas equações de regressão. Para dO_e , verifica-se uma pequena dispersão entre alguns valores estimados entre 15 e 27 μm , podendo ser verificado uma maior presença do erro experimental na Tabela 4.8. Essas características são refletidas pelo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,822$).

Os gráficos dos efeitos principais (Figura 4.34a) mostram o comportamento de dO_e para v_c . A presença de uma mínima vibração ocasionada pelo menor valor de v_c (25 m/min) pode ter sido o responsável pelo menor valor do desvio. Enquanto que para $v_c = 65$ m/min, a presença dos flocos de MLG pode ter produzido um maior efeito de lubrificação, provavelmente causado pela maior v_c , resultando também em um menor valor do desvio. Destaca-se que, independente da v_c utilizada, todas geraram valores abaixo do valor médio de dO_e (23,54 μm).

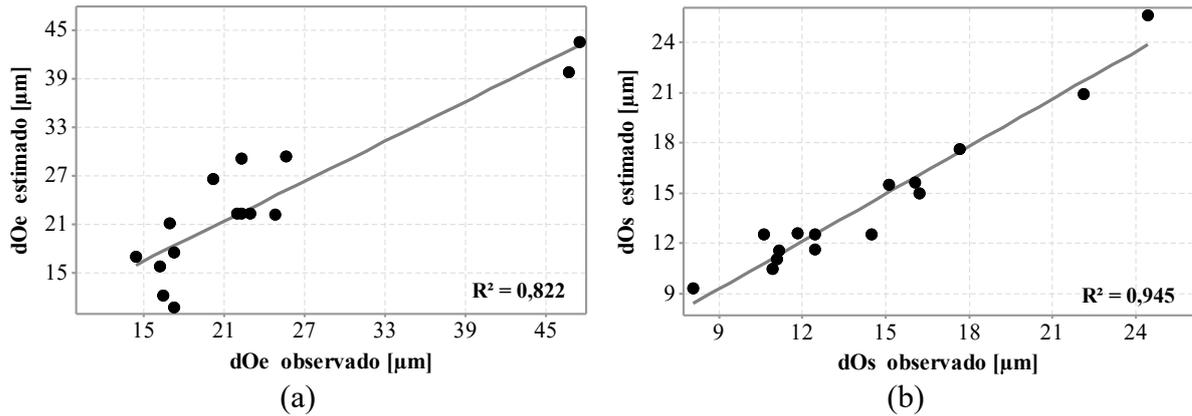


Figura 4.33 – Comparação entre valores observados e estimados na condição RQL+MLG para: (a) dO_e ; (b) dO_s .

O desvio de circularidade na saída do furo (dO_s) teve influência significativa de v_c e de q (Figura 4.34b) de modo que, o aumento no nível desses fatores resultou em menores valores do desvio. Acredita-se que na região final do furo, o efeito refrigerante do fluido quase pode não ser mais sentido. Então, a lubrificação agiria diminuindo o atrito nas regiões de contato da ferramenta e do cavaco com a parede do furo. Isso auxiliaria não causando desgastes excessivos ou aderência de material na superfície usinada. Assim como para dO_e , independente da v_c utilizada, todas geraram valores abaixo de dO_s , que é de $14,31 \mu\text{m}$ (linha média).

Para o avanço, que apresenta um valor-p próximo ao significativo para dO_e e dO_s (Tabela 4.8), a variação de $f = 0,07 \text{ mm/volta}$ para $f = 0,11 \text{ mm/volta}$, foi a que gerou maior redução na variável resposta (Figura 4.34). Provavelmente o menor f foi o que sofreu as maiores instabilidades no corte, ocasionado pela refrigeração mais eficiente do fluido com MLG. Assim como citado para o desvio dimensional, acredita-se que o erro do batimento radial da broca utilizada não tenha tido influência expressiva sobre os valores de dO .

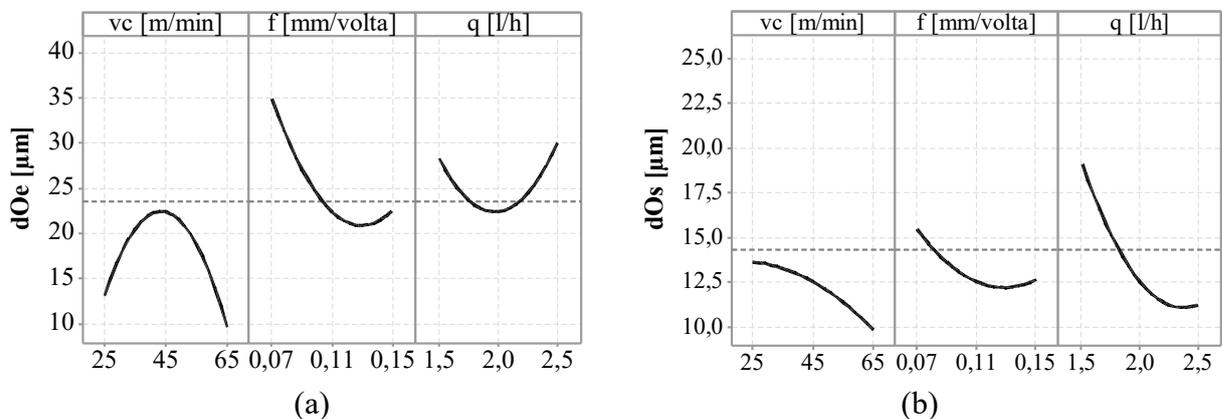


Figura 4.34 – Efeitos principais dos fatores na condição RQL+MLG sobre: (a) dO_e ; (b) dO_s .

Em relação à interação significativa para dO_s , a Figura 4.35 mostra que $q = 1,5$ l/h foi a que gerou maiores desvios de circularidade na saída do furo em função da variação de f . Assim como para dO_e , o aumento de f gerou redução nos valores médios de dO_s . Diferentemente das instabilidades que podem ter sofrido o furo em seu início, na região final provavelmente foi o aumento da temperatura local que facilitou o corte, gerando menores desvios.

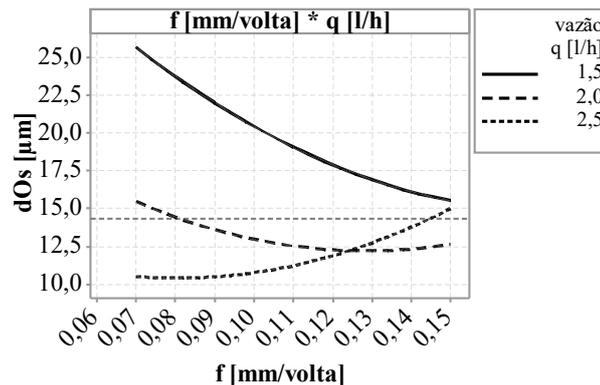


Figura 4.35 – Interação $f \times q$ na condição RQL+MLG sobre dO_s .

A análise da superfície de resposta para o desvio de circularidade na entrada do furo (dO_e) apresenta muito claramente o efeito quadrático de v_c sobre a resposta. Menores desvios são encontrados em várias regiões: nos níveis centrais de f (0,11 mm/volta) e q (2,0 l/h) na Figura 4.36a, e para a maior v_c (65 m/min) na Figura 4.36b e Figura 4.36c. Destaca-se que o maior valor de dO_e está na combinação de menor f (0,07 mm/volta) e maior q (2,5 l/h). Provavelmente, a maior refrigeração não permitiu que o calor gerado no processo de corte facilitasse a entrada da broca no furo.

Na análise da superfície de resposta para o desvio de circularidade na saída do furo (dO_s), percebe-se a influência de q , principalmente na sua interação com v_c . Os menores desvios na saída do furo ocorreram para a maior v_c (Figura 4.36b e Figura 4.36c) e também para a maior q (Figura 4.36a e Figura 4.36c). Diferentemente da situação apresentada para dO_e , o maior valor de dO_s ocorreu com menor q . Acredita-se então, que a presença do fluido acrescido com flocos de MLG forneceu efeito positivo sobre os desvios de circularidade.

4.3 Análise comparativa das variáveis respostas para as condições RQL, RQL+MLG e abundante

Para facilitar a análise dos resultados discutidos neste item, optou-se em rerepresentar a Tabela 3.3 para que se pudessem associar as variáveis de entrada com os testes efetuados.

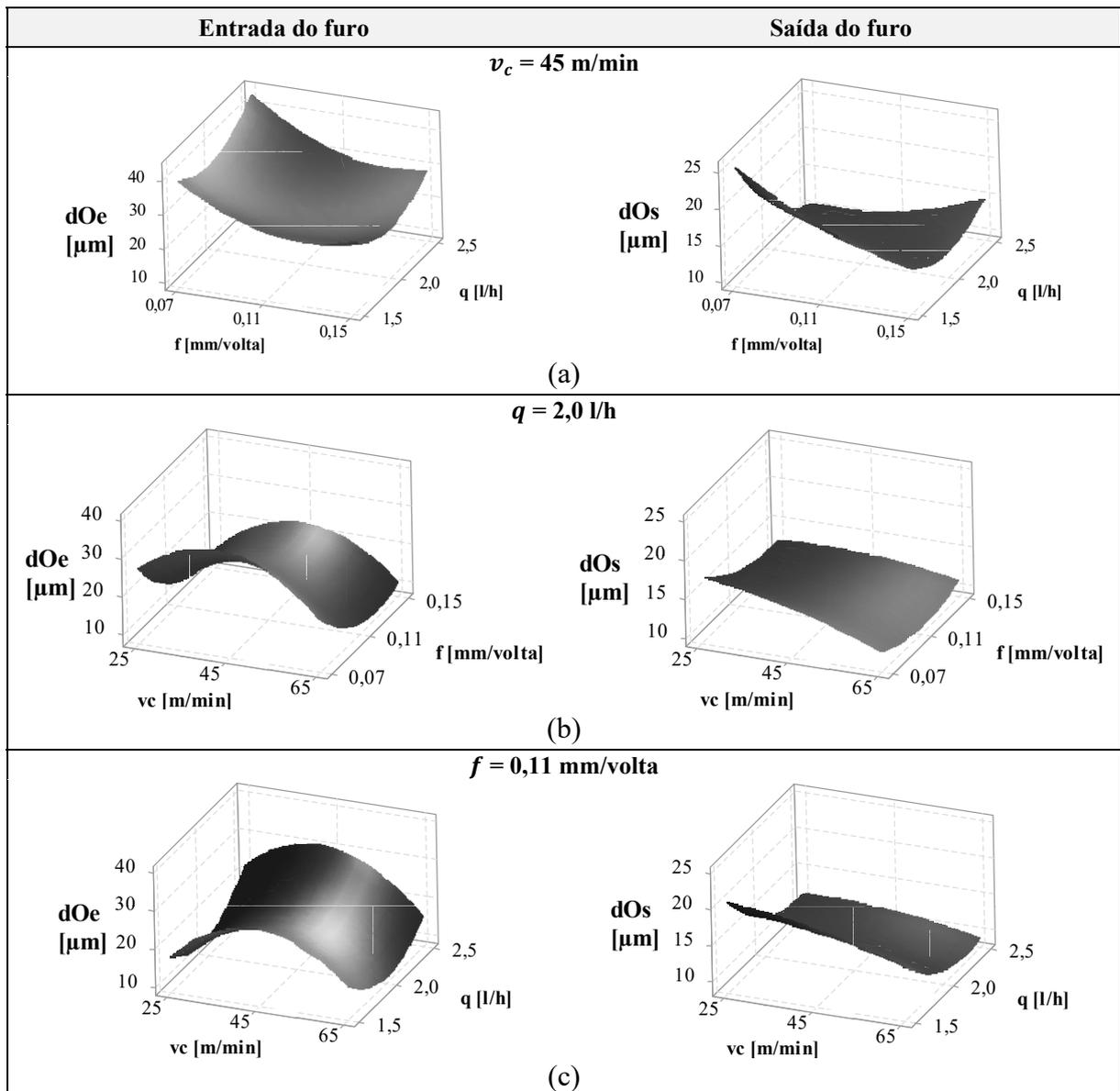


Figura 4.36 – Superfícies de resposta para dO_e e dO_s na condição RQL+MLG com:

(a) $v_c = 45 \text{ m/min}$; (b) $q = 2,0 \text{ l/h}$; (c) $f = 0,11 \text{ mm/volta}$.

Tabela 3.3 – Matriz de experimentos Box-Behnken para as condições RQL e RQL+MLG.

Teste		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fatores	v_c [m/min]	25	25	45	45	25	45	65	65	45	45	65	45	65	45	25
	f [mm/volta]	0,11	0,11	0,15	0,07	0,07	0,11	0,15	0,11	0,07	0,15	0,11	0,11	0,07	0,11	0,15
	q [l/h]	1,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0

Na comparação de cada variável de saída é apresentado um gráfico de colunas com os valores médios de cada teste realizado no experimento, em que as barras de erro representam a incerteza expandida com 95% de confiança. As linhas de referência tracejadas nos gráficos representam o valor médio da variável resposta para a condição abundante.

4.3.1 Esforços de corte

Com o auxílio da Tabela 4.9 e analisando a Figura 4.37 e a Figura 4.38, de modo geral verificam-se que os esforços de corte (F_f e M_t) para as condições aplicadas em quantidade reduzida se apresentam acima do valor médio para a condição abundante.

As vazões aplicadas e a forma de aplicação dos fluidos (externamente ao furo) não foram suficientes para refrigerar e lubrificar o corte de maneira comparável à aplicação do fluido em abundância. Assim, com a maior temperatura gerada e a redução local da ductilidade, foram produzidos cavacos longos que necessitaram de maiores forças para serem expelidos do furo (Figura 4.39a e Figura 4.39b). Zeilmann e Slomp, 2007, destacam que a ausência de um meio para auxiliar no escoamento do cavaco faz com que o mesmo atrite com os canais da broca e a parede do furo, gerando calor e dificultando o processo de furação.

Tabela 4.9 – Valores médios de F_f e M_t para todas as condições lubrificantes.

Condição lubrificante	F_f [N]	M_t [N.m]
RQL	2612,56	5,53
RQL+MLG	2707,64	5,73
Abundante	1720,99	4,38

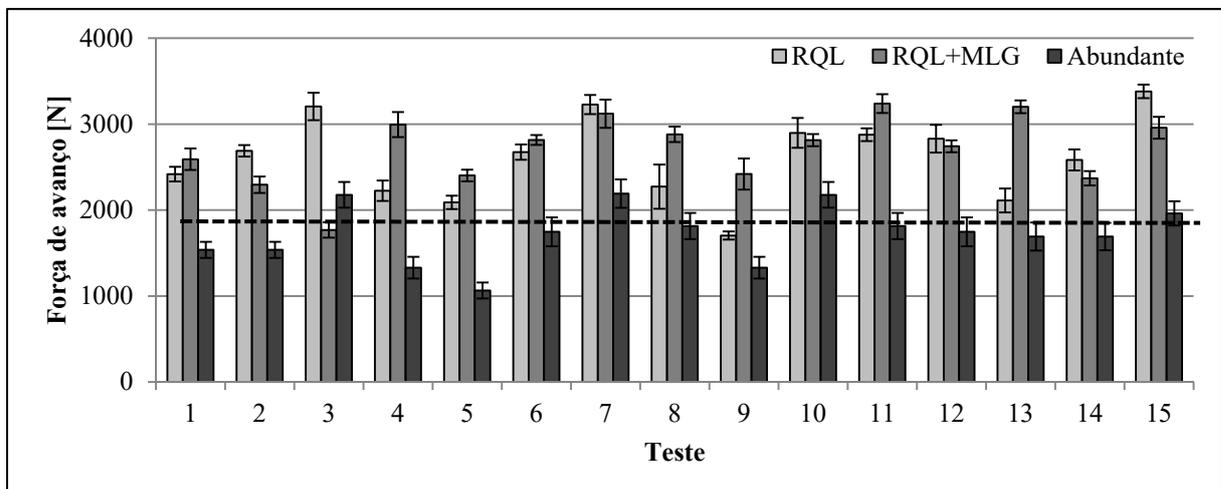


Figura 4.37 – Comparação entre as F_f obtidas para todas as condições de lubrificação.

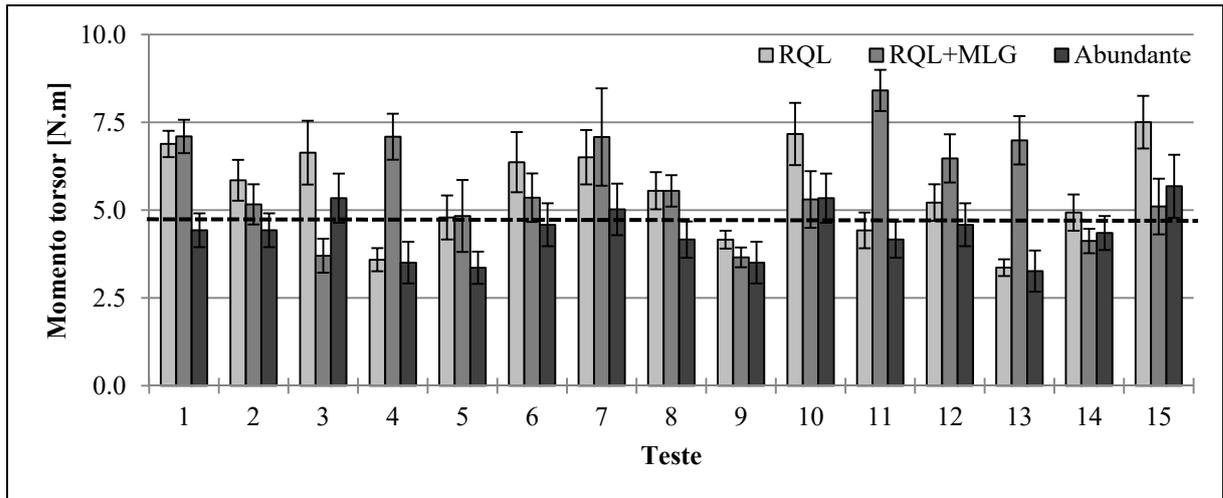


Figura 4.38 – Comparação entre os M_t gerados para todas as condições de lubrificação.

A aplicação do fluido em abundância produziu, principalmente, menores valores de F_f . Isso ocorreu provavelmente porque a grande quantidade de fluido aplicada conseguiu alcançar a zona de corte por mais tempo, refrigerando-a, de modo que não houve facilitação do processo de formação do cavaco devido a não ocorrência da diminuição da resistência ao cisalhamento do material pelo aumento da temperatura local. Essa mesma situação também ocorreu com Zeilmann e Slomp, 2007. Possivelmente, os menores valores para os esforços de corte (F_f e M_t) estão associados à menor quantidade de energia gasta para a remoção dos cavacos, visto que estes apresentam menores comprimentos de modo que o fluido conseguiu realizar a sua retirada de maneira mais facilitada (Figura 4.39c).

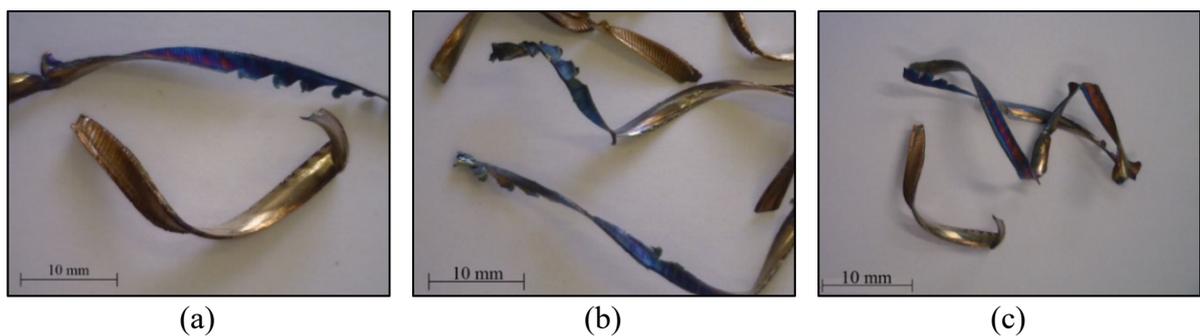


Figura 4.39 – Cavacos produzidos utilizando: (a) RQL; (b) RQL+MLG; (c) abundante.

Os menores valores de F_f e M_t foram conseguidos ao custo de um maior desgaste da ferramenta, para a condição abundante. A Figura 4.40 exibe as imagens das brocas após a execução de 15 testes em comparação à broca nova (Figura 4.40a). A broca utilizada na condição abundante (Figura 4.40b) apresentou acentuado desgaste de flanco na aresta transversal, além dos lascamentos na zona de transição com aresta principal, e na própria aresta.

Acredita-se que essa maior presença de desgaste esteja associada ao não amolecimento do material devido a refrigeração oferecida pelo fluido. A presença da abrasão na região onde a broca está em constante atrito com o fundo do furo tende a gerar desgaste de flanco. A formação de aresta postiça de corte e o seu posterior arrancamento também não pode ser descartada, visto que o AISI 304 é caracterizado por apresentar este tipo de fenômeno [Diniz et al., 2013].

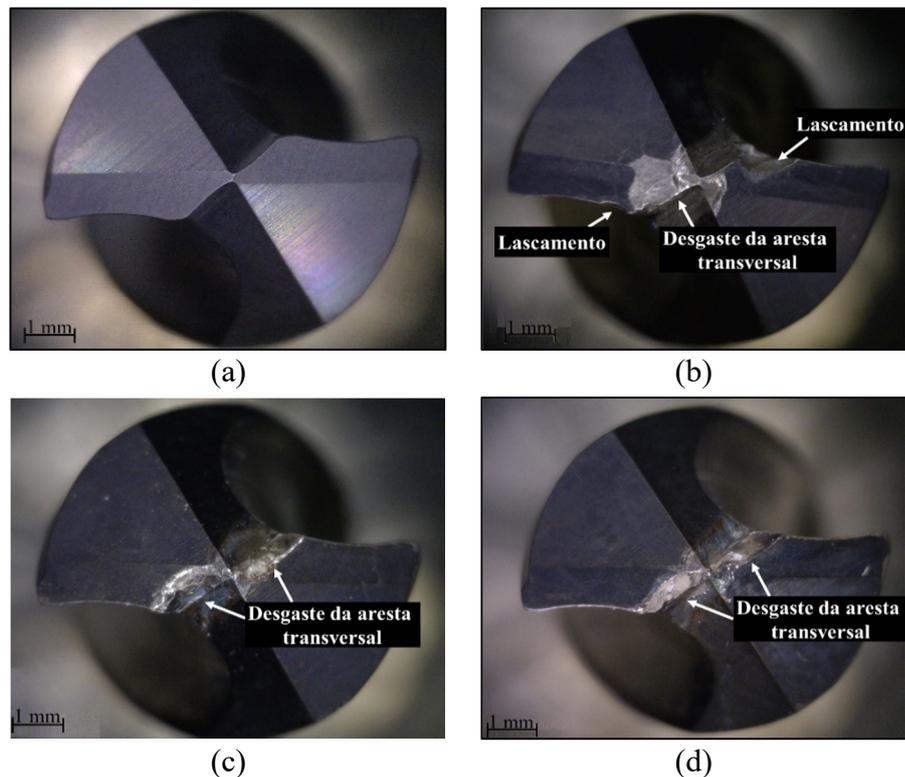


Figura 4.40 – Imagens das brocas: (a) nova; desgastadas nas condições: (b) abundante, (c) RQL e (d) RQL+MLG.

As brocas utilizadas sob as condições RQL e RQL+MLG (Figura 4.40c e Figura 4.40d) também apresentaram este desgaste concentrado na aresta transversal de corte, onde a ferramenta praticamente extruda o material. Apesar de alcançar maiores esforços durante a furação, a utilização da quantidade reduzida preservou mais a ferramenta, avaliando-a apenas visualmente. A utilização dos flocos de MLG adicionado ao RQL não aparentou grandes diferenças quando comparado com a furação com fluido em abundância para F_f e M_t .

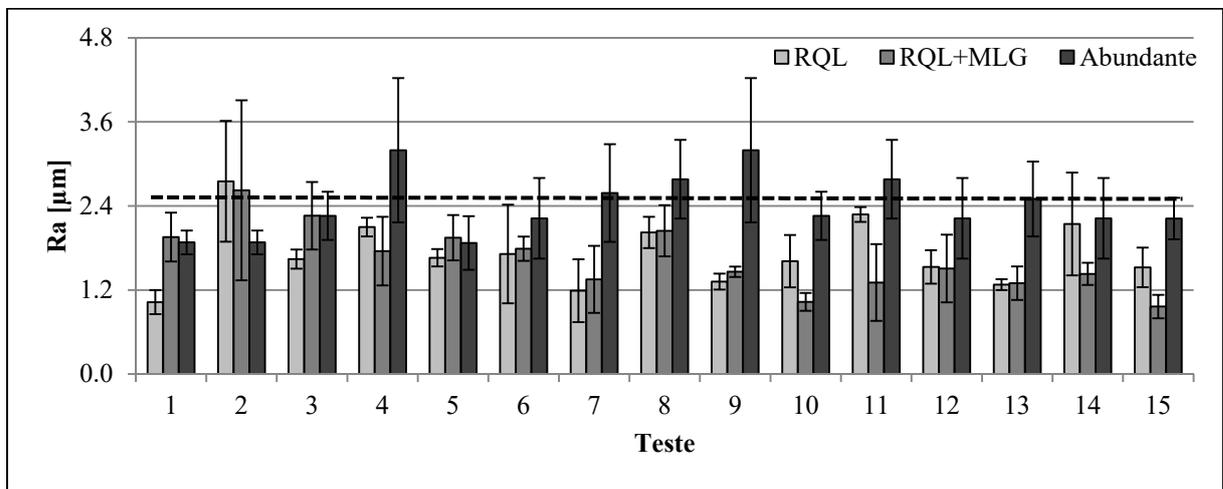
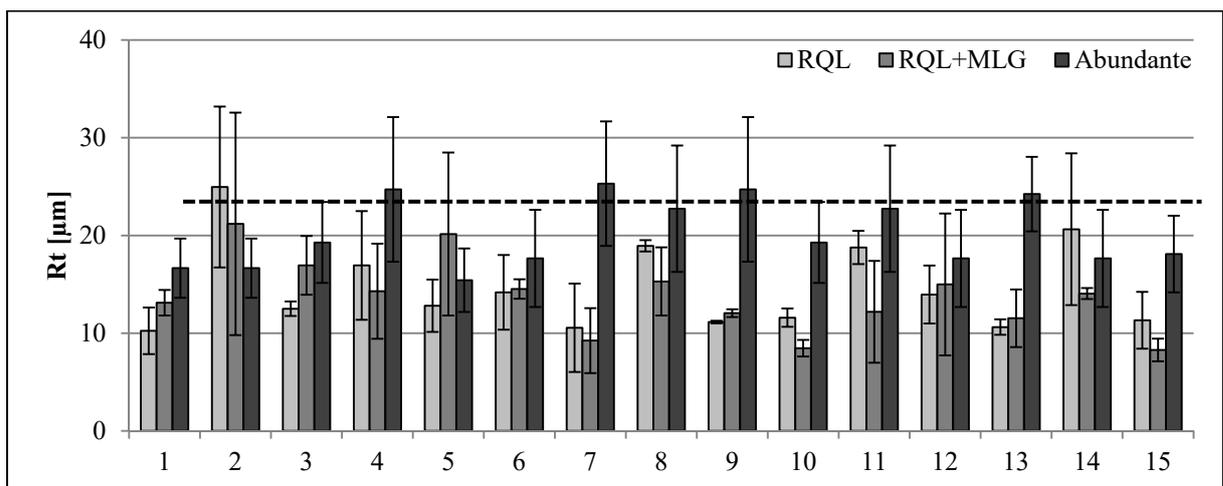
4.3.2 Rugosidade

A Tabela 4.10 mostra que os valores médios resultantes para os parâmetros de rugosidade R_a e R_t na condição RQL+MLG foram bem menores que para a abundante.

Tabela 4.10 – Valores médios de rugosidade para todas as condições lubrificadoras.

Condição lubrificadora	R_a [μm]	R_t [μm]
RQL	1,72	14,61
RQL+MLG	1,65	13,75
Abundante	2,40	20,18

Ao analisar os gráficos correspondentes à textura do furo usinado, considerando R_a (Figura 4.41) e R_t (Figura 4.42), vê-se que os valores médios resultantes da utilização de RQL+MLG estão menores ou próximos aos obtidos com as outras condições.

Figura 4.41 – Comparação entre R_a medidos para todas as condições de lubrificação.Figura 4.42 – Comparação entre R_t medidos para todas as condições de lubrificação.

Acredita-se que os flocos de MLG possam ter auxiliado na redução do atrito de várias maneiras: na parede do furo, diminuindo o contato entre as guias da broca e o cavaco com a

parede do furo; e, até na região de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta, diminuindo o caldeamento do material na superfície recém-usinada. Alguns trabalhos destacam essa característica lubrificante do grafeno em outros processos de usinagem [Silva et al., 2015; Uysal, 2016; Yi et al., 2017].

Sobre as grandes variações dos parâmetros de rugosidades medidos (barras de erros), que podem ser vistas nos gráficos, acredita-se que podem estar associadas à heterogeneidade apresentada pela superfície usinada. Essa heterogeneidade é formada por marcas irregulares sobre a superfície devido à presença de material aderido, e riscos causados pela interação tanto da ferramenta quanto do cavaco com a parede do furo.

Em relação ao material caldeado na parede dos furos, com o auxílio das imagens da Figura 4.43, percebe-se a sua responsabilidade sobre os valores de rugosidade mais altos para R_a e R_t , na condição abundante (Figura 4.43c). Como supracitado (Item 4.3.1), a condição abundante promoveu considerável refrigeração, de modo que o acabamento ficou prejudicado devido às menores temperaturas, já que a formação do cavaco ocorreu de maneira mais agressiva. A Figura 4.43b indica a presença dos flocos de MLG e uma superfície mais homogênea. Para a condição RQL (Figura 4.43a), notam-se marcas de avanço da broca, presença de material aderido, e também marcas mais profundas que se acredita serem formadas pelo escoamento do cavaco para fora do furo.

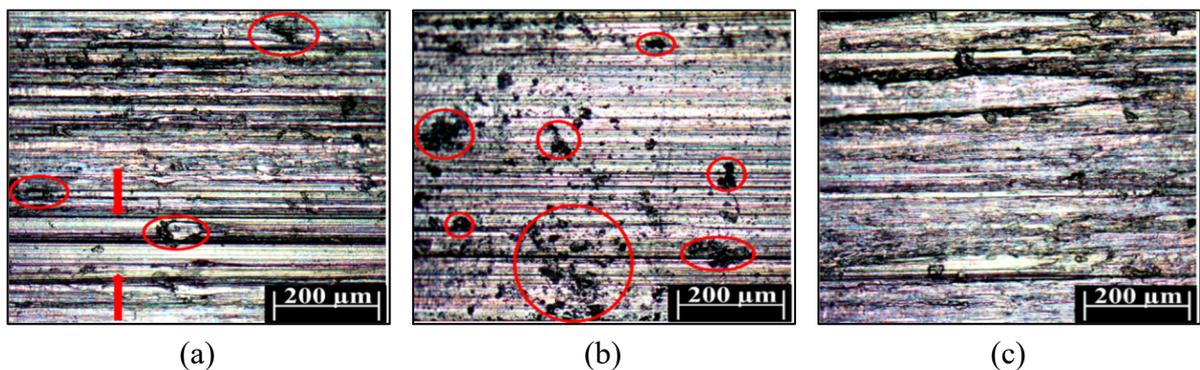


Figura 4.43 – Imagens da textura dos furos obtidos com $v_c = 45$ m/min, $f = 0,07$ mm/volta e $q = 2,5$ l/h (Teste 4) para as condições: (a) RQL, (b) RQL+MLG; (c) abundante.

Visto estes resultados, diz-se que ficam mais evidentes as possibilidades de melhoria que podem ser adicionados ao processo de furação com o emprego dos flocos de MLG. Devem-se verificar melhor essas melhorias com a utilização de brocas com aplicação interna de fluido de corte, onde o grafeno pode alcançar adequadamente a região de corte.

4.3.3 Desvio dimensional

Percebe-se a análise dos gráficos da Figura 4.44 e da Figura 4.45, juntamente com pelas informações da Tabela 4.11 que os furos obtidos com a condição RQL+MLG apresentaram valor médio de 35,8% menor de $d\phi_e$, em comparação ao resultado da condição abundante. Já para $d\phi_s$, a redução do valor médio do desvio foi mais notável, cerca de 60%.

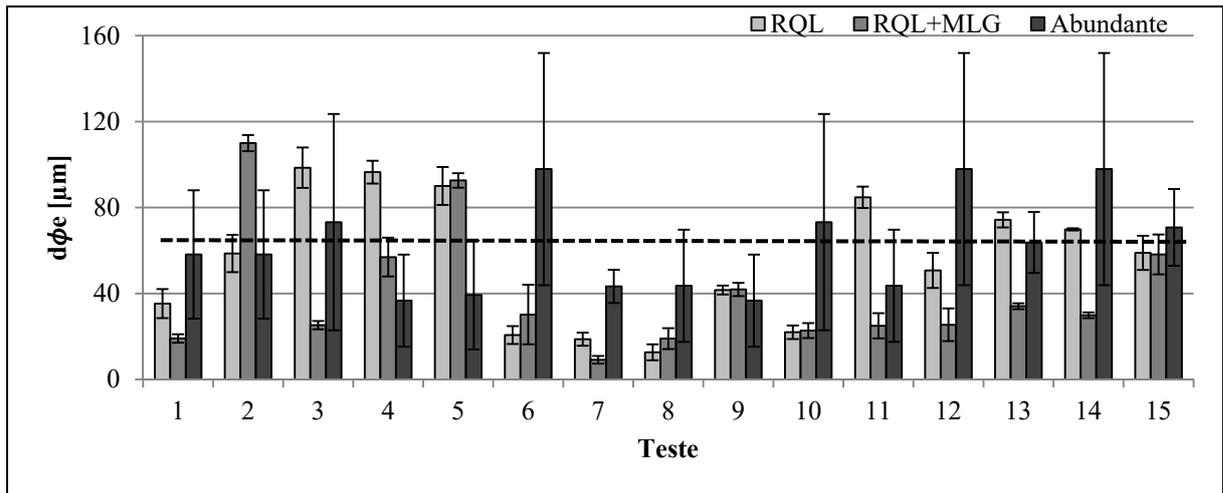


Figura 4.44 – Comparação entre os $d\phi_e$ medidos para todas as condições de lubrificação.

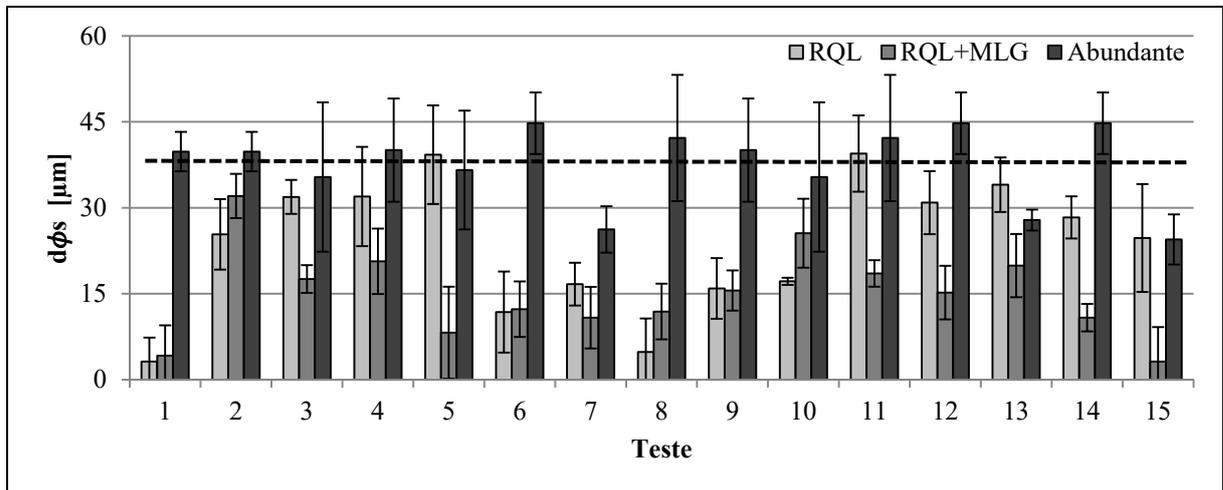


Figura 4.45 – Comparação entre os $d\phi_s$ medidos para todas as condições de lubrificação.

Analisando os gráficos, verifica-se que os valores resultantes da condição abundante têm grande dispersão. A maior refrigeração pode ter sido a causa. Como citado, o aumento da temperatura produziu menores desvios dimensionais devido à dilatação e contração do material.

Tabela 4.11 – Valores médios de $d\phi$ para todas as condições lubrificantes.

Condição lubrificante	$d\phi$ [μm]	
	$d\phi_e$	$d\phi_s$
RQL	55,54	23,70
RQL+MLG	39,95	15,10
Abundante	62,26	37,62

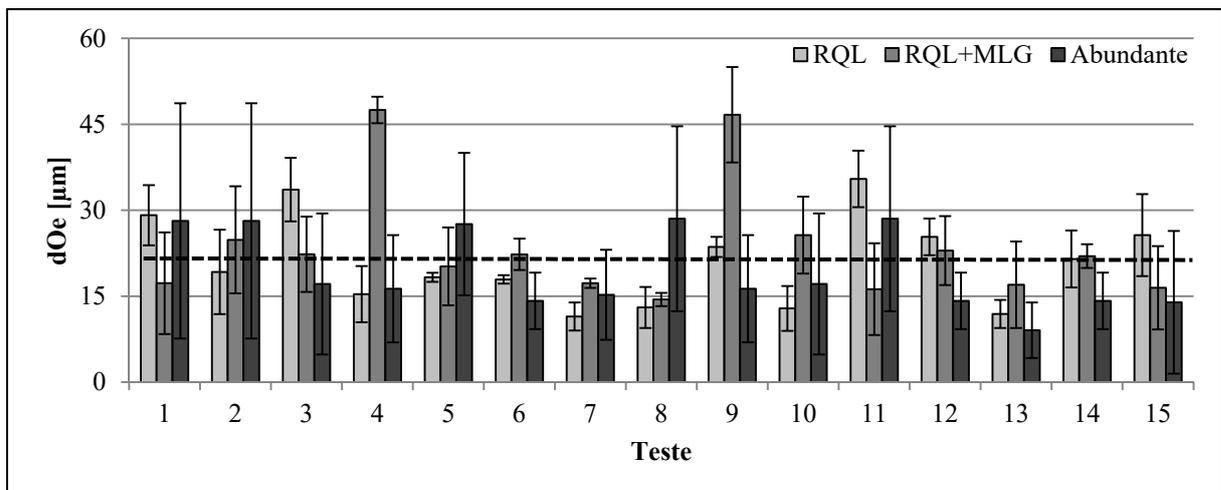
A presença do grafeno pode ter melhorado os efeitos de refrigeração e lubrificação do fluido de corte, auxiliando na remoção do cavaco e diminuindo o atrito com as paredes do furo, não produzindo grandes alterações na dimensão do mesmo [Yi et al., 2017].

4.3.4 Desvio de circularidade

Os desvios de circularidade (Tabela 4.12, Figura 4.46 e Figura 4.47) podem ter sido influenciados pela rigidez da máquina-ferramenta e pelo deslocamento da broca (vibração).

Tabela 4.12 – Valores médios do desvio de circularidade para todas as condições lubrificantes.

Condição lubrificante	dO [μm]	
	dO_e	dO_s
RQL	20,96	9,87
RQL+MLG	23,54	14,31
Abundante	19,24	10,40

Figura 4.46 – Comparação entre os dO_e medidos para todas as condições de lubrificação.

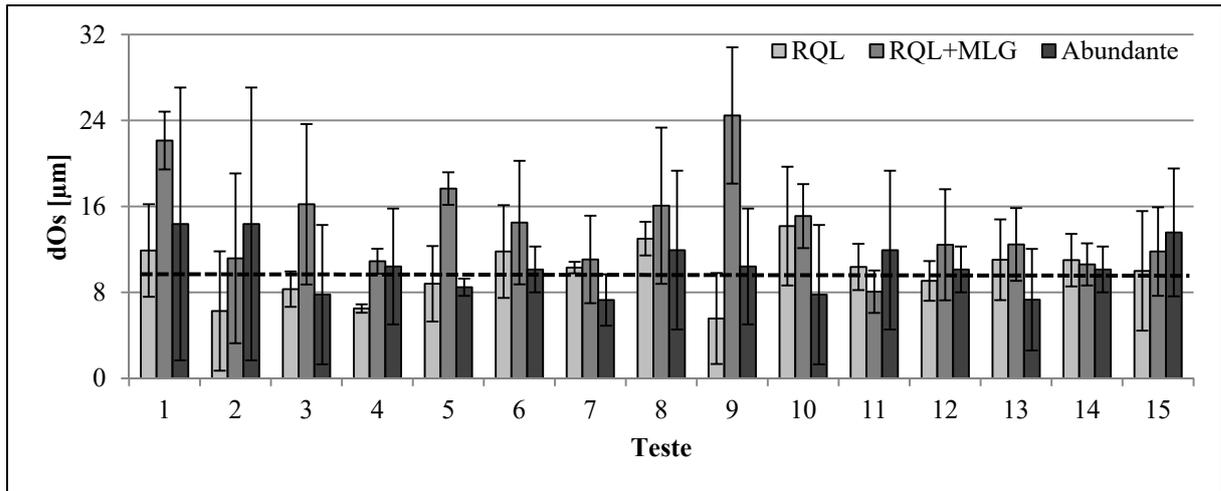


Figura 4.47 – Comparação entre os dO_s medidos para todas as condições de lubrificação.

Analisando os gráficos, tem-se que a condição RQL+MLG apresentou os maiores desvios. Acredita-se que isso pode ter ocorrido pela maior refrigeração causada pela adição do grafeno. Pelos gráficos percebe-se que a condição RQL apresenta grandes valores de incerteza, assim como os desvios resultantes da condição abundante, confirmando que a refrigeração pode prejudicar a geometria do furo (principalmente na entrada).

Espera-se que, assim como apresentado para as condições RQL e RQL+MLG, o erro de batimento radial da broca (aproximadamente $10 \mu\text{m}$) não tenha tido algum tipo de influência sobre o resultado do desvio para a condição abundante.

4.4 Otimização do processo

Finalizando as análises, buscou-se a otimização do processo como um todo, combinando as oito variáveis respostas com o intuito de minimizá-las. São apresentados os níveis dos fatores necessários para a obtenção teórica das variáveis respostas nas condições:

- RQL: $v_c = 65 \text{ m/min}$; $f = 0,07 \text{ mm/volta}$; $q = 1,5 \text{ l/h}$.
- RQL+MLG: $v_c = 41 \text{ m/min}$; $f = 0,15 \text{ mm/volta}$; $q = 2,0 \text{ l/h}$.

Na Tabela 4.13 têm-se os valores resultantes de cada variável resposta obtida pela equação de regressão (Equação 2.4), a partir dos fatores otimizados para as condições RQL e RQL+MLG. Os valores dos coeficientes de regressão podem ser encontrados no Apêndice D.

Para a condição abundante, assumiu-se que os melhores resultados alcançados seriam os obtidos com o emprego dos parâmetros de corte indicados pelo fabricante da broca

($v_c = 45$ m/min e $f = 0,11$ mm/volta). Com estes, os furos seriam gerados em situação favorável à ferramenta de corte. Os resultados dos testes correspondentes à utilização desses fatores (Testes 6, 12 e 14) na condição abundante, também estão apresentados na Tabela 4.13.

Ao analisar os resultados, percebe-se que ambas as condições de lubrificação analisadas (RQL e RQL+MLG) geraram valores teóricos “ótimos” para as 8 variáveis respostas menores que com a condição abundante. No entanto, uma não se sobressai à outra. Provavelmente a presença do grafeno alterou o comportamento das variáveis de entrada e o modo como interagiram.

Tabela 4.13 – Comparativo dos valores otimizados de todas as variáveis respostas para as condições RQL, RQL+MLG e abundante.

Variável Resposta Critério: Minimizar	Valores otimizados		
	RQL	RQL+MLG	Abundante
F_f [N]	1649,47	2583,29	1749,18
M_t [N.m]	3,75	4,55	4,58
R_a [μm]	1,50	1,20	2,22
R_t [μm]	13,29	10,27	17,65
$d\phi_e$ [μm]	40,40	27,12	97,88
$d\phi_s$ [μm]	14,20	12,13	44,76
dO_e [μm]	14,02	22,22	14,18
dO_s [μm]	8,50	12,74	10,13

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir da análise da furação do aço inoxidável AISI 304 utilizando diferentes velocidades de corte (v_c), avanço (f) e vazão de fluido (q) lubrificante são descritas nos itens que se seguem.

- Todas as variáveis respostas deste estudo sofreram influência de v_c e/ou de q quando aplicado em quantidade reduzida, sem e com a presença de flocos de multicamadas de grafeno (respectivamente RQL e RQL+MLG).
- Na utilização de RQL, as altas temperaturas produzidas no furo com a utilização de maior v_c não foram refrigeradas pela menor q . Sendo assim, foram obtidos: menores esforços de corte (força de avanço e momento torsor), devido à diminuição da resistência ao cisalhamento do material; e, melhor acabamento do furo (menor rugosidade e menor desvio de circularidade), visto que o corte mais suave diminuiu a presença de material aderido. Estas são as condições para a otimização destas variáveis resposta.
- A presença de MLG teve certa influência lubrificante e/ou refrigerante sobre o processo, já que q teve interação com v_c e f , para os esforços de corte e para os desvios. Assim, a sua adição ao RQL permitiu uma maior ação lubrificante, gerando furos com menores valores médios de rugosidade e de desvio dimensional. Estas são as condições para a otimização destas variáveis resposta.
- Com os resultados alcançados, não se assegura que a utilização de RQL+MLG traz benefícios ao processo de furação como um todo (em comparação ao RQL). Verificou-se apenas a sua influência positiva em aspectos de acabamento, provavelmente devido à dificuldade do fluido em alcançar a região de corte com a aplicação externa de fluido, de modo que apenas as paredes do furo se beneficiaram do efeito lubrificante do grafeno.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade para o presente trabalho, sugere-se:

- executar furos com os parâmetros otimizados para validação dos valores encontrados;
- utilizar fluido com menor concentração mássica dos flocos de MLG;
- analisar as possíveis alterações subsuperficiais dos furos gerados: alteração da microdureza e transformações metalúrgicas;
- reaplicar o estudo utilizando lubrificação interna (brocas com canais internos).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albertazzi, A.G.; Sousa, A.R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Manole, Barueri, 1ª ed., 2008.

Ankalagi, S.; Gaitonde, V.N.; Petkar, P. Experimental Studies on Hole Quality in Drilling of SA182 Steel, **Materials Today: Proceedings 4**, p. 11201-11209, 2017.

ASM. **Metals Handbook** – Volume 1 Properties and selections: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 10ª ed., 1990.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6409**: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade, 2008.

Asthakov, V.P. Ecological Machining: Near-dry Machining. In: Davim, J.P. **Machining: Fundamentals and Recents Advances**, Springer, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-213-5.

Astakhov, V.P. **Geometry of single-point turning tools and drills**. Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer, 2010a.

Astakhov, V.P. Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance. In: Davim, J.P. **Surface Integrity Machining**, Springer, 2010b.

Astakhov, V.P. **Tribology of metal cutting**. Tribology and interface engineering series, nº 52, Series Editor: B.J. Briscoe, Elsevier, 2006.

Asthakov, V.P.; Davim, J.P. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. In: Davim, J.P. **Machining: Fundamentals and Recents Advances**, Springer, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-213-5.

Attanasio, A.; Faini, F.; Outeiro, J.C. FEM simulation of tool wear in drilling, **Procedia CIRP**, v. 58, p. 440-444, 2017. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.249.

Balaji, M.; Murthy, B.S.N.; Mohan Rao, N. Optimization of Cutting Parameters in Drilling Of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi and ANOVA, **Procedia Technology**, v. 25, p. 1106-1113, 2016. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.217.

Balandin, A.A.; Ghosh, S.; Bao, W.; Calizo, I.; Teweldebrhan, D.; Miao F.; Lau, C.N. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, **Nanoletters**, v. 8, n° 3, p. 902-907, 2008. doi: 10.1021/nl0731872.

Barbosa, P.A. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2014.

Baumgaertner Filho, A.J. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Benedicto, E.; Carou, D.; Rubio E.M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes, **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99-116, 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.075.

Benlahmidi, S.; Aouici, H.; Boutaghane, F.; Khellaf, A.; Fnides, B.; Yallese, M.A. Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI H11 steel (50 HRC) with CBN7020 tools, **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, Springer-Verlag, 2016. doi: 10.1007/s00170-016-9121-3.

BGI/GUV-I 718-E. **Minimum quantity lubrication for machining operations (Information)**. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2010.

Bordin, F.M. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos**. Dissertação de mestrado, Universidade de Caxias do Sul, 2013.

Box, G.E.P.; Behnken, D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables, **Technometrics**, v. 2, n° 4, p. 455-475, 1960.

Callister Jr., W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. LTC, Rio de Janeiro, 7ª ed., 2018.

Camargo, R. **Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

Capello, E.; Langella, A.; Nele, L.; Paoletti, A.; Santo, L.; Tagliaferri, V. Drilling Polymeric Matrix Composites. In: Davim, J.P. **Machining: Fundamentals and Recents Advances**, Springer, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-213-5.

Castillo, W.J.F. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

Cavichiolli, F. O valor do sistema de fixação correto. **O mundo da usinagem**, n° 113, p. 8-10, 2016.

Debnath, S.; Reddy, M.M.; Yi, Q.S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review, **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.071.

Diniz, A.E.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber Editora, São Paulo, 8ª ed., 2013.

Dolinsek, S. Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 133, p. 63-70, 2003.

Ferraresi, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Blucher, São Paulo, 1970.

Ferreira, S.L.C; Bruns, R.E.; Ferreira, H.S.; Matos, G.D.; David, J.M.; Brandão, G.C.; Silva, E.G.P.; Portugal, L.A.; Reis, P.S.; Souza, A.S.; Santos, W.N.L. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, **Analytica Chimica Acta**, v. 597, p. 179-186, 2007. doi: 10.1016/j.aca.2007.07.011.

Figueiredo, M.T. **Estudo da influência da geometria da broca de metal-duro na qualidade do furo realizado em ferro fundido nodular**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Fonseca, A.F. **Mini-Curso: Introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e dos nanotubos de carbon**. Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, 2011.

Grzesik, W. Machining of Hard Materials. In: Davim, J.P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**, Springer, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-213-5.

Guibert, N.; Paris, H.; Rech, J.; Claudin, C. Identification of thrust force models for vibratory drilling, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, p. 30-38, 2009. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.007.

Hu, Z.; Chen, F.; Xu, J.; Ma, Z.; Guo, H.; Chen, C.; Nian, Q.; Wang, X.; Zhang, M.; Fabricating graphene-titanium composites by laser sintering PVA bonding graphene titanium coating: Microstructure and mechanical properties, **Composites Part B**, 2017. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.09.069.

Justino, C.I.L.; Gomes, A.R.; Freitas, A.C.; Duarte, A.C.; Rocha-Santos, T.A.P. Graphene based sensors and biosensors, **Analytical Chemistry**, 2017. doi: 10.1016/j.trac.2017.04.003.

Ke, F.; Ni, J.; Stephenson, D.A. Continuous chip formation in drilling, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, p. 1652-1658, 2005. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.03.011.

KTA. **KTA Spindle Toolings**: Silver series BT 30, BT40, BT50 MAS (403). <http://new.ktaspidletoolings.com/site/wp-content/uploads/bt-catalog.pdf>, 2013, Acesso em: 26-04-2018.

Lasocka, I.; Szulc-Dąbrowska, L.; Skibniewski, M.; Skibniewska, E.; Strupinski, W.; Pasternak, I.; Kmiec, H.; Kowalczyk, P. Biocompatibility of pristine graphene monolayer: Scaffold for fibroblasts, **Toxicology in Vitro**, v. 48, p. 276-285, 2018. doi: 10.1016/j.tiv.2018.01.028.

Lee, E.; Wei, X.; Kysar, J.W.; Hone, J. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, **Science**, v. 321, p. 385-388, 2008. doi: 10.1126/science.1157996.

Li, M.; Xiong, P.; Yan, F.; Li, S.; Ren, C.; Yin, Z.; Li, A.; Li, H.; Ji, X.; Zheng, Y.; Cheng, Y. An overview of graphene-based hydroxyapatite composites for orthopedic applications, **Bioactive Materials**, v. 3, p. 1-18, 2018. doi: 10.1016/j.bioactmat.2018.01.001.

Li, R.; Shih, A.J. Tool Temperature in Titanium Drilling, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 129, p. 740-749, 2007. doi: 10.1115/1.2738120.

Lima, A. **Análise dos efeitos gerados pelos parâmetros de corte em processos de usinagem sobre a integridade superficial das peças em aço ABNT 4340**. Tese de doutorado, Universidade Metodista de Piracicaba, 2008.

Machado, A.R.; Abrão, A.M.; Coelho, R.T.; Silva, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Blucher, São Paulo, 3ª ed., 2015.

Machuno, L.G.B.; Oliveira, A.R.; Furlan, R.H.; Lima, A.B.; Morais, L.C.; Gelamo, R.V. Multilayer Graphene Films Obtained by Dip Coating Technique, **Materials Research**, v. 18 (4), p. 775-780, 2015. doi: 10.1590/1516-1439.005415.

Mahmoudi, T.; Wang, Y.; Hahn, Y.B. Graphene and its derivatives for solar cells application, **Nano Energy**, 2018. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.02.047.

Manohar, M.; Jomy J.; Selvaraj T.; Sivakumar D. Application of Box Behnken design to optimize the parameters for turning Inconel 718 using coated carbide tools, **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 4, p. 620-642, 2013.

Martins, P.S. **Avaliação dos sistemas de fixação hidráulico e térmico de broca de metal-duro em furação do cabeçote do motor fire**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2008.

Mello, A. V. **Retificação da liga Ti-6Al-4V, com fluido de corte contendo partículas de grafeno**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

Mondal, S.C.; Kumar, J. Application of Box-Behnken design for the optimisation of process parameters in dry drilling operation, **International Journal Productivity and Quality Management**, v. 18, n° 4, p. 456-473, 2016.

Montgomery, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley, 7ª ed., 2009.

Montgomery, D.C.; Runger, G.C. **Estatística aplicada para engenheiros**. LTC, Rio de Janeiro, 5ª ed., 2012.

Nag A, Mitra A, Mukhopadhyay SC, Graphene and its Sensor-Based Applications: A Review, **Sensors and Actuators: A Physical**, 2017. doi:10.1016/j.sna.2017.12.028.

Nicola, G.L.; Missel, F.P.; Zeilmann, R.P. Surface quality in milling of hardened H13 steel, **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, p. 53–62, 2010. doi: 10.1007/s00170-009-2382-3.

Novoselov, K.S. Nobel Lecture: Graphene: Materials in the Flatland, **Reviews of Modern Physics**, v. 83, 2011. doi: 10.1103/RevModPhys.83.837.

Novoselov, K.S.; Falko, V.I.; Colombo, L.; Gellert, P.R.; Schwab, M.G.; Kim, K. A roadmap for graphene, **Nature**, v. 490, p. 192-200, 2012. doi: 10.1038/nature11458.

Patne, H.S.; Kumar, A.K.; Karagadde, S.; Joshi, S.S. Modeling of temperature distribution in drilling of titanium, **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 133, p. 598-610, 2017. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.09.024.

Petropoulos, G.P.; Pandazaras, C.N.; Davim, J.P. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. In: Davim, J.P. **Surface Integrity Machining**, Springer, 2010.

Pinto, G.T.B. **Análise da influência da geometria de brocas especiais na furação de chapas finas aeronáuticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

Porto, J.F.B. **Deteção de falhas em uma broca geradas durante a furação de chapas de aço inoxidável AISI 304 através da análise de dispersão dos sinais monitorados de força e torque**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Pradeep, K.M.; Shakeel, A.L. Drilling of AISI 304 Stainless Steel under Liquid Nitrogen Cooling: A Comparison with Flood Cooling, **Materials Today: Proceedings 4**, p. 1518-1524, 2017. doi: 10.1016/j.matpr.2017.01.174.

Quimatic. **Nebulizador IV Tapmatic**. <http://www.quimatic.com.br/produtos/usinagem/nebulizador-4/>, 2018, Acesso em: 29-01-2018.

Rahim, E.A.; Dorairaju, H. Evaluation of mist flow characteristic and performance in minimum quantity lubrication (MQL) machining, **Measurement**, 2018. doi:10.1016/j.measurement.2018.03.015.

Rahim, E.A.; Sasahara, H. An analysis of surface integrity when drilling Inconel 718 using palm oil and synthetic ester under MQL condition, **Machining Science and Technology**, v. 15, p. 76-90, 2011. doi: 10.1080/10910344.2011.557967.

Rios, M.G.S. **Estudo do comportamento do fluido sintético na furação de aço inoxidável**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

Rouxinol, F.P.; Gelamo, R.V.; Amici, R.G.; Vaz, A.R.; Moshkalev, S.A. Low contact resistivity and strain in suspended multilayer graphene, **Applied Physics Letters**, v. 97, 253104, 2010. doi: 10.1063/1.3528354.

Ruszaj, A.; Kruszynski, B.; Grzesik W. Surface Integrity of Machined Surfaces. In: Davim, J.P. **Surface Integrity Machining**, Springer, 2010.

Sandvik Coromant. **Tipos de desgaste** (Furação: Desgaste e solução de problemas). <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/wear-and-troubleshooting/wear-types/pages/default.aspx>, 2018, Acesso em: 15-03-2018.

Santana, M.I. **Influência da preparação das arestas de corte de brocas helicoidais no processo de furação**. Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

Santos. S.C.; Sales, W.F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. Artliber Editora, São Paulo, 2007.

Sathyamoorthy, V.; Deepan, S; Sathya Prasanth S.P.; Prabhu, L. Optimization of Machining Parameters for Surface Roughness in End Milling of Magnesium AM60 Alloy, **Indian Journal of Science and Technology**, v. 10 (32), p. 1-7, 2017. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i32/104651.

Sharma, A. K.; Tiwari, A. K.; Dixit, A. R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review, **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 1-18, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.146.

Sharman, A.R.C.; Amarisinghe, A.; Ridgway, K. Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 200, p. 424-432, 2008. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.08.080

Silva, A.L.V.C; Mei, P.R. **Aços e ligas especiais**. Ed. Blucher, São Paulo, 3ª ed., 2010.

Silva, L.E. **Efeito da mesogeometria da broca e das condições de lubrificação sobre o acabamento do furo em AÇO DIN S700MC**. Dissertação de mestrado, Universidade de Passo Fundo, 2016.

Silva, R.B.; Ezugwu E.O.; Guimaraes, C.; Marques, A.; Fernandes, L.A.; Gelamo, R.V. **Grinding of mould steel with graphene platelets dispersed in a vegetable-based cutting fluid**. STLE Annual Meeting & Exhibition, 2015.

Smith, T.G. **Cutting Tool Technology**: Industrial Handbook. Springer, 2008.

Smith, W.F.; Hashemi, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. McGraw-Hill, 5ª ed., 2012.

Souza, A.J.; Rodrigues, S.I.; Rosa, G.C. **Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI**

420C utilizando ferramenta wiper. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 21 a 25 de agosto, Fortaleza-Ceará, 2016.

Stephenson, D.A.; Agapiou, J.S. **Metal cutting theory and practice.** Taylor and Frances Group, 2^a ed., 2006.

Stemmer, C.E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos.** Editora da UFSC, Florianópolis, 2^a ed., 1995.

Sultan, A.Z.; Sharif, S.; Kurniawan, D. Effect of Machining Parameters on Tool Wear and Hole Quality of AISI 316L Stainless Steel in Conventional Drilling, **Procedia Manufacturing**, v. 2, p. 202-207, 2015a. doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.035.

Sultan, A.Z.; Sharif, S.; Kurniawan, D. Chip Formation When Drilling AISI 316L Stainless Steel using Carbide Twist Drill, **Procedia Manufacturing**, v. 2, p. 224-229, 2015b. doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.039.

Trent, E.M.; Wright, P.K. **Metal Cutting.** Butterworth-Heinemann, 4^a ed., 2000.

Tschätsch, H. **Applied Machining Technology.** Springer, 8^a ed., 2009.

Uçak, N.; Çiçek, A. The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 31, p. 662-673, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.003>.

Uysal, A. Investigation of flank wear in MQL milling of ferritic stainless steel by using nano graphene reinforced vegetable cutting fluid, **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 68, p. 446-451, 2016. doi: 10.1108/ILT-10-2015-0141.

Vas, J.S.; Fernandes, A.; Souza, A.D.; Rai, A.; Quadros, J.D. Analysis of Temperature Changes during Dry Drilling of Austenitic Stainless Steels on Twist Drills Having Different Point Angles, **Journal of Mechanical Engineering and Automation**, v. 6 (5A), p. 121-125, 2016. doi: 10.5923/c.jmea.201601.23.

Walter Titex. **DC 150 – powerful and versatile: The first family in the new perform product line.** Walter Tools, 2015.

Werkema, M.C.C.; Aguiar, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo.** Fundação Cristiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 1996.

Whitehouse, D.J. **Handbook of surface and nanometrology.** CRC Press, 2^a ed., 2014.

Wosniak, F.B. **Análise do processo de furação profunda no aço AISI 4150.** Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

Ye, M.; Zhang, Z.; Zhao, Y.; Qu, L. Review: Graphene Platforms for Smart Energy Generation and Storage, **Joule**, v. 2, p. 245-268, 2018. doi: 10.1016/j.joule.2017.11.011.

Yi, S.; Li, G.; Ding, S.; Mo, J. Performance and mechanisms of graphene oxide suspended cutting fluid in the drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 29, p. 182-193, 2017. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.027.

Zarbin, A. J. G.; Oliveira, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo vadis?, **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1533-1539, 2013.

Zeilmann, R.P.; Slomp, J. **Furação com redução da quantidade de fluido de corte.** 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, 23 a 25 de outubro, Cusco-Peru, 2007.

Zhong, Y.; Zhen, Z.; Zhu, H. Graphene: Fundamental research and potential applications, **FlatChem**, v. 4, p. 20-32, 2017. doi: 10.1016/j.flatc.2017.06.008.

APÊNDICES

Os Apêndices contêm dados complementares à análise dos resultados e suas discussões.

APÊNDICE A – Valores médios das variáveis respostas para a condição RQL

A Tabela A.1 apresenta os valores médios das variáveis de saída para a condição de lubrificação RQL.

Tabela A.1 – Valores médios das variáveis respostas para os furos gerados com a condição RQL.

Teste	Fatores			Variáveis respostas							
	v_c [m/ min]	f [mm/ volta]	q [l/h]	F_f [N]	M_t [N.m]	R_a [μ m]	R_t [μ m]	$d\phi$ [μ m]		dO [μ m]	
								$d\phi_e$	$d\phi_s$	dO_e	dO_s
1	25	0,11	1,5	2417,97	6,88	1,03	10,23	35,27	3,17	29,13	11,90
2	25	0,11	2,5	2689,42	5,85	2,75	24,96	58,60	25,37	19,23	6,27
3	45	0,15	2,5	3205,55	6,64	1,64	12,50	98,53	31,90	33,60	8,30
4	45	0,07	2,5	2225,84	3,59	2,10	16,93	96,47	31,97	15,37	6,50
5	25	0,07	2,0	2089,53	4,79	1,66	12,81	90,07	39,27	18,30	8,80
6	45	0,11	2,0	2674,08	6,37	1,71	14,17	20,63	11,80	17,93	11,80
7	65	0,15	2,0	3228,33	6,51	1,19	10,55	18,73	16,67	11,47	10,30
8	65	0,11	1,5	2272,74	5,55	2,02	18,93	12,63	4,83	13,03	13,00
9	45	0,07	1,5	1703,65	4,16	1,32	11,14	41,63	15,93	23,60	5,57
10	45	0,15	1,5	2898,03	7,17	1,61	11,59	21,97	17,17	12,87	14,17
11	65	0,11	2,5	2876,39	4,42	2,28	18,77	84,73	39,47	35,47	10,37
12	45	0,11	2,0	2830,83	5,22	1,53	13,95	50,77	30,90	25,37	9,07
13	65	0,07	2,0	2111,64	3,36	1,28	10,62	74,27	34,03	11,90	11,03
14	45	0,11	2,0	2583,36	4,93	2,14	20,64	69,80	28,33	21,50	11,00
15	25	0,15	2,0	3381,05	7,50	1,52	11,32	58,93	24,73	25,67	10,00

APÊNDICE B – Valores médios das variáveis respostas para a condição RQL+MLG

A Tabela B.1 apresenta os valores médios das variáveis de saída para a condição de lubrificação RQL+MLG.

Tabela B.1 – Valores médios das variáveis respostas para os furos gerados com a condição RQL+MLG.

Teste	Fatores			Variáveis respostas							
	v_c [m/min]	f [mm/volta]	q [l/h]	F_f [N]	M_t [N.m]	R_a [μm]	R_t [μm]	$d\phi$ [μm]		dO [μm]	
								$d\phi_e$	$d\phi_s$	dO_e	dO_s
1	25	0,11	1,5	2591,64	7,10	1,96	13,12	19,07	4,20	17,27	22,13
2	25	0,11	2,5	2294,99	5,16	2,62	21,19	110,00	32,07	24,83	11,17
3	45	0,15	2,5	1768,24	3,70	2,26	16,94	25,27	17,57	22,33	16,20
4	45	0,07	2,5	2994,12	7,09	1,76	14,29	56,93	20,67	47,50	10,90
5	25	0,07	2,0	2402,92	4,83	1,95	20,15	92,60	8,20	20,20	17,67
6	45	0,11	2,0	2815,68	5,36	1,79	14,52	30,20	12,30	22,30	14,50
7	65	0,15	2,0	3121,69	7,08	1,35	9,23	9,13	10,83	17,27	11,07
8	65	0,11	1,5	2881,23	5,55	2,05	15,29	19,00	11,90	14,43	16,07
9	45	0,07	1,5	2419,47	3,65	1,46	12,05	41,87	15,57	46,67	24,47
10	45	0,15	1,5	2813,91	5,30	1,03	8,46	22,73	25,57	25,67	15,10
11	65	0,11	2,5	3238,65	8,41	1,31	12,19	24,93	18,53	16,23	8,07
12	45	0,11	2,0	2742,46	6,47	1,51	14,99	25,43	15,20	22,97	12,43
13	65	0,07	2,0	3202,23	6,99	1,30	11,53	34,07	19,90	17,00	12,47
14	45	0,11	2,0	2369,31	4,12	1,43	14,05	29,83	10,83	22,00	10,60
15	25	0,15	2,0	2957,99	5,10	0,96	8,28	58,17	3,17	16,47	11,80

APÊNDICE C – Valores médios das variáveis respostas para a condição abundante

A Tabela C.1 apresenta os valores médios das variáveis de saída para a condição de lubrificação abundante.

Tabela C.1 – Valores médios das variáveis respostas para os furos gerados com a condição abundante.

Teste	Fatores		Variáveis respostas							
	v_c [m/ min]	f [mm/ volta]	F_f [N]	M_t [N.m]	R_a [μm]	R_t [μm]	$d\phi$ [μm]		dO [μm]	
							$d\phi_e$	$d\phi_s$	dO_e	dO_s
1	25	0,11	1537,44	4,43	1,88	16,65	58,18	39,81	28,14	14,37
2	25	0,11	1537,44	4,43	1,88	16,65	58,18	39,81	28,14	14,37
3	45	0,15	2177,66	5,34	2,26	19,28	73,20	35,38	17,14	7,79
4	45	0,07	1329,56	3,51	3,20	24,71	36,67	40,07	16,31	10,41
5	25	0,07	1064,31	3,36	1,87	15,42	39,28	36,60	27,59	8,48
6	45	0,11	1747,19	4,58	2,22	17,65	97,88	44,76	14,18	10,13
7	65	0,15	2191,25	5,02	2,59	25,30	43,31	26,22	15,24	7,29
8	65	0,11	1815,26	4,16	2,78	22,74	43,58	42,19	28,52	11,93
9	45	0,07	1329,56	3,51	3,20	24,71	36,67	40,07	16,31	10,41
10	45	0,15	2177,66	5,34	2,26	19,28	73,20	35,38	17,14	7,79
11	65	0,11	1815,26	4,16	2,78	22,74	43,58	42,19	28,52	11,93
12	45	0,11	1747,19	4,58	2,22	17,65	97,88	44,76	14,18	10,13
13	65	0,07	1691,97	3,27	2,50	24,24	63,76	27,87	9,06	7,32
14	45	0,11	1747,19	4,58	2,22	17,65	97,88	44,76	14,18	10,13
15	25	0,15	1961,60	5,68	2,22	18,10	70,74	24,48	13,94	13,58

APÊNDICE D – Coeficientes da equação de regressão para as variáveis respostas

São expostos neste apêndice os coeficientes de regressão para a Equação 2.4, aqui apresentada como Equação D.1.

$$Y = b_0 + b_1v_c + b_2f + b_3q + b_{12}v_c f + b_{13}v_c q + b_{23}f q + b_{11}v_c^2 + b_{22}f^2 + b_{33}q^2 \quad (D.1)$$

Nas Tabelas D.1 e D.2 os coeficientes são informados em função das variáveis respostas (Y) deste trabalho, para as condições lubrificadoras RQL e RQL+MLG, respectivamente.

Tabela D.1 – Coeficientes da equação de regressão para as variáveis respostas obtidas com a condição RQL.

Coeficiente de regressão	F_f	M_t	R_a	R_t	$d\phi_e$	$d\phi_s$	dO_e	dO_s
b_0	-2459	5,09	-3,71	-45,2	261	-30	173,7	-22,6
b_1	-18,2	-0,0791	0,0739	0,665	-1,54	-0,39	-1,262	-0,166
b_2	25536	47,5	67,3	780	-2607	-782	-45	392
b_3	2958	-0,92	-0,46	-0,7	-67	88,9	-127,1	15,8
b_{12}	-54,6	0,135	0,016	0,44	-7,6	-0,89	-2,44	-0,60
b_{13}	8,31	-0,0024	-0,0367	-0,372	1,22	0,311	0,808	0,0750
b_{23}	2683,0	0,5	-9,35	-61,0	272	-16	362	-85,0
b_{11}	0,078	0,000408	0,000039	0,00032	-0,0043	-0,0013	-0,00239	0,00145
b_{22}	-15412	-79	-229	-3161	9461	3447	-2383	-731
b_{33}	-653	0,04	0,960	7,38	9,8	-19,8	14,28	-3,28

Tabela D.2 – Coeficientes da equação de regressão para as variáveis respostas obtidas com a condição RQL+MLG.

Coeficiente de regressão	F_f	M_t	R_a	R_t	$d\phi_e$	$d\phi_s$	dO_e	dO_s
b_0	-2676	3,1	6,11	18,1	-6	1,1	122,4	139,9
b_1	-56,9	-0,456	0,0061	0,106	-0,27	1,89	2,54	-0,220
b_2	46541	188,2	-3,4	-13	-1089	299	-978	-674
b_3	3895	0,83	-4,49	-4,6	118	-55,9	-94,7	-73,5
b_{12}	-199	-0,055	0,324	2,99	2,97	-1,26	1,25	1,40
b_{13}	16,4	0,1199	-0,0352	-0,279	-2,125	-0,531	-0,144	0,0742
b_{23}	-20254	-62,9	11,69	78,1	-157	-164	-52	183,3
b_{11}	0,664	0,00288	0,000214	0,00036	0,0332	-0,0068	-0,02755	-0,00196
b_{22}	8134	-292	-169	-1480	4204	286	3957	952
b_{33}	-626	0,35	1,288	3,13	5,9	26,4	27,2	10,53