

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Pedro Augusto Bompeixe Cheliga

**O EFEITO DA MICROTERTURIZAÇÃO A LASER EM FERRAMENTAS DE CORTE
DE METAL DURO, CLASSE P30, DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM DO
AÇO ABNT 1020**

CURITIBA

2019

PEDRO AUGUSTO BOMPEIXE CHELIGA

**O EFEITO DA MICROTTEXTURIZAÇÃO A LASER EM FERRAMENTAS DE CORTE
DE METAL DURO, CLASSE P30, DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM DO
AÇO ABNT 1020**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Rocha Machado

Co-orientador: Dr. Wagner de Rossi

CURITIBA

2019

Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.

Deve ser impressa no verso da folha de rosto.

A Biblioteca da PUCPR oferece o serviço gratuitamente.

Para solicitar, necessário enviar o trabalho para o email

biblioteca.processamento@pucpr.br

Em até 48h a ficha será encaminhada para o email do solicitante.



PEDRO AUGUSTO BOMPEIXE CHELIGA

**EFEITO DA MICROTERTURIZAO A LASER EM FERRAMENTAS DE
CORTE DE METAL DURO, CLASSE P30, NA USINAGEM DO AO ABNT
1020**

Dissertaçao apresentada ao Curso de Pós-Graduaçao em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtençao do título mestre em Engenharia Mecânica.

COMISSAO EXAMINADORA

Prof. Dr. Alisson Rocha Machado
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr.

Curitiba, 04 de Setembro de 2019

Dedico este trabalho ao meu pai Ricardo Cheliga e
a minha mãe Maria Isabel Mulinari Bompeixe
Cheliga por toda confiança e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Maria Isabel Mulinari Bompeixe Cheliga e ao meu pai Ricardo Cheliga pelo amor incondicional, confiança, incentivo e apoio.

Ao meu orientador Prof. Alisson Rocha Machado, pelos ensinamentos, incentivos e apoio durante a realização desse trabalho.

Ao professor Wagner de Rossi por me receber e orientar durante a realização dos ensaios no IPEN.

A técnico do laboratório de usinagem da PUCPR Rogério Ferreira da Silva.

A todos os professores e funcionários envolvidos no programa de pós-graduação da PUC-PR, em especial ao professor Fred Lacerda Amorim e à Jane Rocha.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte do desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

A textura de uma superfície é formada por irregularidades que podem ser ordenadas ou não. Uma superfície organizada e ordenada altera as propriedades e a função de uma peça ou ferramenta. Dentre todas as técnicas utilizadas para alterar uma superfície precisamente, de forma organizada e ordenada, se destaca a microtexturização a laser. Trata-se de uma técnica relativamente nova na fabricação de texturas precisas em superfícies quaisquer, podendo ser utilizada para diversas finalidades. A qualidade de superfícies da cunha cortante de uma ferramenta é importante, pois afeta o processo de formação do cavaco e as variáveis envolvidas na usinagem. Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito da microtexturização a laser em ferramentas de corte de metal duro, classe P30, durante o processo de torneamento do aço ABNT 1020. Foram desenvolvidas texturas, com laser de pulsos ultracurtos (femtosegundos - 10^{-15} s), numa área de 4 mm x 4 mm na superfície de saída de bits com cunha retificada e aresta arredondada previamente. Foram utilizados quatro tipos diferentes de texturas: canais paralelos à aresta principal de corte, canais perpendiculares à aresta principal de corte, canais oblíquos (a 45°) à aresta principal de corte e do tipo “*Chevron*”. Estas ferramentas foram utilizadas em ensaios individuais para medição da temperatura de corte pelo método do termopar ferramenta-peça e das componentes de força de usinagem, no torneamento, variando-se a velocidade de corte e o avanço, tanto na condição a seco como usando MQL (mínima quantidade de lubrificante). Ferramentas sem texturas também foram utilizadas para comparação. As superfícies das ferramentas de corte foram caracterizadas em um MEV (microscópio eletrônico de varredura) antes e depois dos ensaios. Os resultados mostraram que as microtexturas auxiliam na redução da temperatura de corte, em especial para a ferramenta com microtextura paralela a aresta de corte. Os ensaios de força mostraram que para baixas velocidades de corte existe um aumento da força de usinagem para as ferramentas microtexturizadas, e uma redução da força de usinagem para valores de velocidade de corte acima de 180 m/min. A avaliação da superfície no MEV mostrou a precisão das microtexturas fabricadas com o laser de femtosegundos, e também uma superfície mais íntegra para as ferramentas com microtexturas paralelas a aresta de corte após os ensaios, com relação as demais testadas.

Palavras chaves: Texturização a laser; Torneamento de aços; Temperatura de usinagem, Forças de usinagem; Ferramentas de metal duro; MQL.

ABSTRACT

The texture of a surface is formed by uneven irregularities that can be organized or not. An organized and ordered surface changes its properties and the function of a part or a tool. Among all the techniques used to alter a surface precisely in an organized way, stands out the laser microtexturization, which is a relatively new technique for production of precise textures on surfaces, and can be used for various purposes. The quality of the cutting wedge surfaces of a tool is important as it affects the chip formation process and the variables involved in machining. This work aims to study the effect of laser microtexturization on P30 grade of cemented carbide cutting tools during the turning of ABNT 1020 steel. Textures were produced using a laser of ultra-short pulses (femtoseconds), in an area of 4 mm x 4 mm on the rake face of bits with ground wedges and honed cutting edges. Four different types of organized textures were produced: channels parallel to the cutting edge; channels perpendicular to the cutting edge; channels oblique to the cutting edges (45°) and “*Chevron*” type. Individual turning tests were performed for cutting temperature and machining force measurements, varying the cutting speed and feed rate, both in dry cutting and using MQL. Non-textured tools were also tested for comparisons. The surface of the tools were characterized within a SEM (scanning electron microscope) before and after machining. The results showed that the microtextures helped to reduce the cutting temperature, especially for the tool with channels parallel to the cutting edge. In the force measurement tests, at low cutting speeds the microtextures increased the machining force components, but at cutting speeds above 180 m / min the forces were reduced. The SEM evaluation showed the accuracy of the microtextures produced by the femtosecond laser, and a lesser damaged surface for the tools with microtextures parallel to the cutting edge after the tests, in relation to the others types of textures.

Keywords: Laser texturing; Steel turning; Machining temperature, machining forces; Carbide tools; MQL.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Pesquisas realizadas na área de texturização de superfícies nos últimos 50 anos: (a) Número de publicações por ano e (b) Métodos de pesquisa. Fonte: adaptado de Gropper et al. (2015).</i>	19
<i>Figura 2. Planos de cisalhamento na formação do cavaco. Fonte: Machado et al. (2015).</i>	23
<i>Figura 3. Variação do formato do cavaco em função das variáveis do processo. Fonte: Machado e Silva, (1999).</i>	25
<i>Figura 4. Zona de aderência e de escorregamento da ferramenta de corte. Fonte: Machado et. al., (2015).</i>	26
<i>Figura 5. Área de contato entre duas superfícies com baixas cargas. Fonte: adaptado de Shaw et al., (1960).</i>	27
<i>Figura 6. Os três regimes de atrito em sólidos. Fonte: adaptado de Shaw et al., (1960).</i>	28
<i>Figura 7. Modelo de distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. Fonte: Zorev et al., (1963).</i>	29
<i>Figura 8. Ilustração da sequencia de eventos que ocorrem no processo de controle da altura da aresta postiça de corte (APC). Fonte: adaptado (TRENT, 1963).</i>	31
<i>Figura 9. Regiões onde o calor é observado durante a formação de cavacos. Fonte: Machado et al., (2015).</i>	32
<i>Figura 10. Direções de aplicação do fluido de corte. Fonte: SILVA et al., (2006).</i>	38
<i>Figura 11. Tipos de textura: a) sequencial, b) ponto (spot), c) forma livre linha, d) forma livre ponto, e) tira, f) ilha. Fonte: adaptado de Szymański et al. (1990).</i>	40
<i>Figura 12. Tipos de orientação de textura: A) Perpendicular, B) Pontos, C) Diagonal e com pontos, D) Diagonal 45°, E) Paralelas. Fonte: adaptado de Olleak et al. (2017).</i>	40
<i>Figura 13. Distribuição de intensidade em feixes gaussianos (LIMA, 2006; RIVA, 2007).</i>	47
<i>Figura 14 Características geométricas do feixe laser. Fonte: adaptado de ZHANG et al., 2011.</i>	48
<i>Figura 15. Influência da área texturizada nas forças de usinagem (Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011).</i>	51
<i>Figura 16. Posicionamento da textura. Fonte: Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011.</i>	51
<i>Figura 17. Diferentes microtexturas na superfície de saída. a) Orientação paralela; b) Orientação perpendicular; c) orientação cruzada. Fonte: Adaptado de Kawasegi et al., 2009.</i>	53
<i>Figura 18. Diferentes texturas fabricadas por EDM. A) Ferramenta sem textura; B) Ferramenta texturizada com orientação cruzada; C) Ferramenta texturizada com orientação paralela à superfície de corte; D) Ferramenta texturizada com orientação perpendicular à superfície de corte. Fonte: Adaptado de D. Arulkirubakaran et al. (2016).</i>	54
<i>Figura 19. Microestrutura do aço ABNT 1020, ataque com Nital 3%; ampl. 50X. Fonte: O autor, 2019.</i>	58
<i>Figura 20. Ângulos da ferramenta de corte para torneamento. Fonte: Stemmer, (1993) (adaptado).</i>	59
<i>Figura 21. Detalhes das texturas estudadas nesta pesquisa, todas com profundidade de 0,03mm, canais com largura de 0,05mm, espaçamento entre eles de 0,05mm, distância das extremidades de 0,05mm e a</i>	

área total microtexturizada foi de 4mmx4mm. A) 45°. B) Perpendicular. C) Paralelas. D) “V” (Chevrans). Fonte: O Autor, 2019.....	60
Figura 22. Canais obtidos durante os ensaios para obtenção das melhores condições de usinagem. A figura à direita mostra uma imagem de perfilometria dos canais.....	62
Figura 23. A ferramenta sobre o goniômetro e sobre a mesa de deslocamento.	63
Figura 24. Esquema ilustrativo do Efeito Seebeck que rege os termopares	64
Figura 25. Termopar de aço ABNT 1020 e ferramenta de metal duro de classe P30. Fonte: O Autor (2019).	64
Figura 26. Ilustração do esquema de calibração do termopar ferramenta-peça. Fonte: Favaretto (2018).	65
Figura 27. Curvas geradas pelos termopares na calibração. Fonte: Favaretto (2018).	65
Figura 28. Gráfico da curva de calibração do termopar Metal duro P30 / Aço ABNT 1020.	66
Figura 29 a) - Corte central do corpo da contra ponta; b) - Ponta rotativa isolada mostrando os elementos internos; c) - Representação do compartimento de mercúrio metálico de delrin em SolidWorks®. Fonte: Favaretto (2017, 2018).	68
Figura 30. Contra ponta modificada, montada. Fonte: Favaretto (2017).	69
Figura 31. Representação esquemática do sistema de medição de temperatura montado. Fonte: Favaretto, 2018.	70
Figura 32. Teste de temperatura variando a velocidade de corte. A) a seco; B) com MQL.....	74
Figura 33. Teste de temperatura variando o avanço. A) – a seco; B) com MQL.....	75
Figura 34. Influência das texturas na temperatura da interface cavaco-ferramenta nos ensaios com variação da velocidade de corte.....	78
Figura 35. Efeito do sistema lubri-refrigerante nas temperaturas da interface cavaco-ferramenta, para os ensaios em que se variou a velocidade de corte.	79
Figura 36. Efeito da velocidade de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta.	80
Figura 37. Influência das texturas na temperatura da interface cavaco-ferramenta nos ensaios com variação do avanço.	81
Figura 38. Efeito do avanço na temperatura da interface cavaco-ferramenta.	82
Figura 39. Teste de força variando a velocidade de corte. A) a seco; B) com MQL.	83
Figura 40. Efeito da velocidade de corte na força de usinagem.	85
Figura 41. Efeito da textura da ferramenta na força de usinagem.	86
Figura 42. Efeito do fluido aplicado por MQL na força de usinagem.	87
Figura 43. Teste de força variando o avanço. A) a seco; B) com MQL.....	88
Figura 44. Efeito do avanço na força de usinagem.....	89
Figura 45. Efeito da microtexturização das ferramentas na força de usinagem.....	90
Figura 46. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à	

<i>aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 47. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 48. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço.. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 49. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de força quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de força quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 50. Ferramenta de corte com microtexturas de canais com orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de temperatura, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de temperatura, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 51. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de força, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de força, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 52. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B)</i>	

Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV. 101

Figura 53. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizadas nos ensaios de força, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizadas nos ensaios de força, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV. 102

Figura 54. Ferramenta de corte lisa utilizada nos ensaios de temperatura e força, a seco e com MQL, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte lisa utilizada nos ensaios de temperatura e força, a seco e com MQL, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV. 104

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1. Geometria da ferramenta de corte</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 2. Dados da curva de calibração do termopar Metal duro P30/Aço ABNT 1020.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 3. ANOVA dos resultados de temperatura quando se variou a velocidade de corte</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 4. ANOVA dos resultados de temperatura quando se variou o avanço.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 5. ANOVA dos resultados de força de usinagem quando se variou a velocidade de corte.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 6. ANOVA dos resultados de força de usinagem quando se variou o avanço.....</i>	<i>89</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC.....	Aresta Postiça de Corte
Fu.....	Força de usinagem
Fc.....	Força de corte
Ff.....	Força de avanço
Fp.....	Força passiva
ap.....	Profundidade de Corte
FN.....	Força Normal
FZ.....	Força de cisalhamento
H.....	Dureza
MEV.....	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQF.....	Mínima Quantidade de Fluido
Vc.....	Velocidade de Corte
Vf.....	Velocidade de Avanço
f.....	Avanço
h.....	Espessura de corte
b.....	Largura de corte
FT.....	Força de Atrito
Mpa.....	Mega Pascal
t.....	Tempo
K.....	Condutividade térmica
k.....	Difusividade térmica
c.....	Calor específico
Lf.....	Calor latente de fusão do material
Lv.....	Calor latente de vaporização do material
P.....	Potência média do laser

E.....Energia do pulso

r.....Raio do feixe

A.....Coeficiente de absorvidade do material irradiado

M^2Parâmetro de qualidade do feixe

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 FORMAÇÃO DO CAVACO	22
2.1.1 Tipos de cavaco	23
2.1.2 Formas de cavaco	24
2.2 INTERFACE FERRAMENTA/CAVACO	25
2.3 ATRITO NO CORTE DE METAIS	26
2.3.1 Zona de aderência	29
2.3.2 Zona de escorregamento	30
2.4 ARESTA POSTIÇA DE CORTE (APC)	30
2.5 TEMPERATURA DE USINAGEM	31
2.5.1 Métodos de medição de temperatura na usinagem.....	35
2.6 FLUIDOS DE CORTE	36
2.7 FUNÇÕES DO FLUIDO DE CORTE	36
2.8 CLASSIFICAÇÕES DOS FLUIDOS DE CORTE	37
2.9 MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	38
2.10 TEXTURAS EM FERRAMENTAS DE CORTE	39
2.10.1 Tipos de textura	39
2.10.2 Métodos de obtenção das texturas	41
2.11 FUNDAMENTOS DO LASER	42
2.11.1 Interação Laser matéria.....	43
2.11.2 Variáveis do processo de texturização a laser	45
2.11.3 Ablação por pulsos de laser ultracurtos	49

2.11.4	Mecanismos físicos da ablação	49
2.12	EFEITO DA TEXTURA NA USINAGEM	50
3.	METODOLOGIA	57
3.1	ASPECTOS GERAIS	57
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	57
3.2.1	Preparação das amostras do aço ABNT 1020	57
3.2.2	Preparação dos Bits de metal duro de classe P30	58
3.2.3	Preparação das microtexturas através do laser de Femtosegundos	60
3.2.4	Calibração do termopar ferramenta-peça.....	63
3.2.5	Medição da temperatura da usinagem	67
3.2.6	Medição da força de usinagem.....	71
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	RESULTADOS DE TEMPERATURA.....	73
4.2	RESULTADOS DE FORÇA DE USINAGEM	82
4.3	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS FERRAMENTAS ANTES E APÓS A USINAGEM	92
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
5.1	CONCLUSÕES.....	106
5.2	SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	109

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da economia, a necessidade de se desenvolver uma manufatura cada vez mais eficiente, com decisões corretas baseadas em informações mais precisas, tornou-se uma necessidade para a sobrevivência de qualquer indústria manufatureira.

Desde o início, os processos de usinagem vem sendo otimizados, com foco na redução do tempo de fabricação, obtido por meio da utilização do ferramental correto e condições de corte de acordo com a capacidade das máquinas e ferramentas (Rodrigues e Diniz, 1989).

A utilização de superfícies texturizadas com a finalidade de aprimorar o desempenho de contato não é um conceito novo. A própria natureza produz superfícies adequadas para suas funções. Por exemplo, as estruturas de superfície especiais podem aumentar a adesão, como no caso de patas de rãs, que permitem que elas caminhem com segurança sobre superfícies úmidas; ou nas peles de tubarões, reduzindo o arrasto aerodinâmico, fazendo com que eles se movimentem com maior facilidade na água (Brushan et al., 2009).

Em 1996 as pesquisas sobre texturas de superfícies ganharam um novo impulso, quando Etsion and Burstein (1996) publicaram um de seus primeiros artigos sobre texturização de superfície. Eles realizaram testes de campo para comparar o desempenho de selos mecânicos não texturizados com os texturizados e mostraram que a texturização poderia aumentar a vida útil dos selos em até três vezes. A partir de então, devido aos resultados promissores obtidos, centenas de estudos teóricos e experimentais começaram a ser desenvolvidos com a finalidade de melhorar o desempenho de contatos tribológicos, como ilustrado na Figura 1 (Etsion et al., 1996).

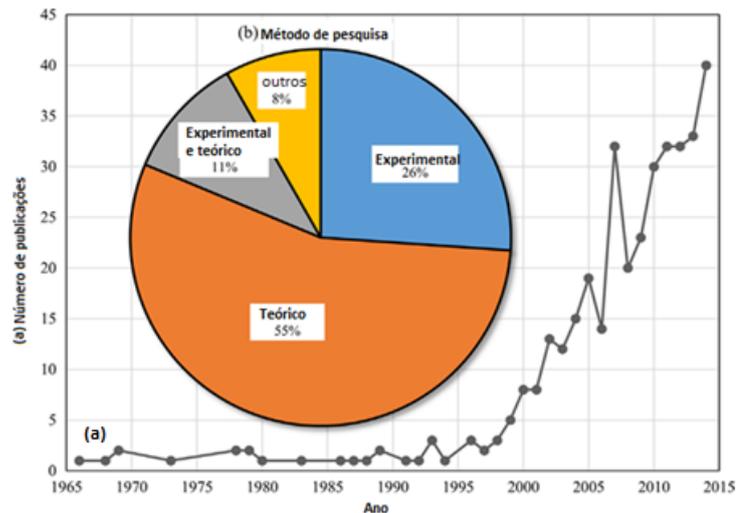


Figura 1. Pesquisas realizadas na área de texturização de superfícies nos últimos 50 anos: (a) Número de publicações por ano e (b) Métodos de pesquisa. Fonte: adaptado de Gropper *et al.* (2015).

O design ideal da textura superficial depende muito do tipo de contato e condições operacionais, sendo que em certos casos, as texturas foram notificadas como sendo prejudiciais, se projetadas incorretamente (Dobrica *et al.*, 2010).

Para aplicações tribológicas, onde o atrito, a lubrificação e o desgaste são o foco principal, a mudança do conceito tradicional de superfícies isotrópicas para uma plataforma de engenharia a fim de transmitir características específicas evoluiu lentamente. Isso se deve ao fato das texturas de superfície geralmente aumentarem a rugosidade total da superfície, aumentando o atrito e o desgaste (Costa *et al.*, 2017).

Processos de usinagem com alta precisão em microescalas vêm sendo desenvolvidas com o passar dos anos e atualmente existem os lasers de pulso super curto (*ultrashort lasers*) disponíveis em laboratórios de pesquisa, que podem gerar pulsos de luz que vão além de picosegundos (10^{-12} s), a femtosegundos (10^{-15} s) com energias de até centenas de microjoules e altas intensidades, na faixa de 10^{12} - 10^{14} W/cm². Esses pulsos são mais curtos do que o período de vibração térmica da rede cristalina de um material (na faixa de 10^{-11} a 10^{-10} s), o que reduz a energia transferida ao material, implicando em uma zona afetada pelo calor negligenciável, preservando assim as propriedades do material circundante. A usinagem por feixes de laser permite gravar ou cortar todos os tipos de materiais em uma escala altamente precisa, de nanométrica a micrométrica (Liang *et al.*, 2003; Diels e Rudolph, 2006; Wang *et al.*, 2010; Samad *et al.*, 2012). De acordo com a literatura (Nolte *et al.*, 1997; Asthakov, 2014; Erbele *et al.*, 2015), os lasers de femtosegundos conseguem criar uma melhor integridade da superfície do que a

usinagem com lasers de nanosegundos ou picosegundos.

Em usinagem, as condições da interface cavaco-ferramenta exercem papel fundamental para o sucesso da operação. Essas condições influenciam praticamente todas as variáveis de saída importantes do processo, tais como: forças e potência, temperatura, vida e desgaste das ferramentas, qualidade da peça, etc.

Segundo Olleak *et al.* (2017), ferramentas de corte microtexturizadas são mais eficientes do que as ferramentas de corte tradicionais, especialmente quando aplicadas na usinagem de ligas de materiais nobres, como as ligas de titânio e as ligas de níquel, as quais experimentam alta fricção, adesão intensa e possibilidade de desenvolvimentos de arestas postiças de corte (APC), devido à afinidade química e baixa condutividade térmica desses materiais. A superfície texturizada da ferramenta de corte contribui para uma usinagem melhorada, reduzindo a área de contato aparente geral onde menores forças e temperaturas de corte podem ser alcançadas e, por consequência, menor desgaste da ferramenta.

Diferentes padrões de texturas podem ser aplicados, cada qual tendo um efeito diferente a ser analisado de acordo com o material a ser estudado. Kawasegi *et al.* (2009), por exemplo, investigaram o efeito da texturização no desempenho de ferramentas na usinagem de ligas de alumínio a seco e com lubrificação, utilizando diferentes padrões de textura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo estudar os efeitos da texturização em ferramentas de corte (bits) de metal duro P30 na temperatura de corte e na força de usinagem, durante o processo de torneamento de aço ABNT1020 a seco e com MQL (mínima de quantidade lubrificante).

1.1.2 Objetivos Específicos

Verificar o efeito das microtexturas (4 diferentes configurações: Paralelas, perpendiculares, 45° e Chevron) comparadas com uma ferramenta lisa, no comportamento da temperatura da interface cavaco-ferramenta-peça a seco e com MQL:

- Variando a velocidade de corte.
- Variando o avanço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORMAÇÃO DO CAVACO

De acordo com a literatura (Ferraresi, 1970) o cavaco consiste no subproduto final, presente em todos os processos de usinagem. O cavaco pode se distinguir de diferentes maneiras (quanto aos aspectos, tipos, formas e tamanhos), dependendo da operação de usinagem, embora possa apresentar variações em uma mesma operação. No torneamento, por exemplo, o cavaco pode variar, praticamente em todas as formas possíveis.

Segundo a literatura (Machado *et al.*, 2015), o cavaco é formado em altas velocidades de deformação, seguidas de ruptura do material da peça. O processo pode ser dividido em quatro eventos distintos:

Recalque inicial: devido à penetração da cunha cortante no material da peça, uma pequena porção deste (ainda unido à peça) é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.

Deformação e ruptura: inicialmente o material pressionado sofre uma deformação elástica, seguido de uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente até a ruptura. Na maior parte das vezes, essa ruptura é dada por cisalhamento, apesar de existir um estado de tensões que combina tensões de compressão/tração e de cisalhamento e leve o material à ruptura, segundo algum critério próprio de sua natureza frágil ou dúctil. A ruptura ocorre, separando o material da peça do cavaco, na aresta de corte, com a abertura de uma trinca. Dependendo da natureza do material (dúctil ou frágil) essa trinca poderá se propagar na direção do plano de cisalhamento primário ou se congelar na aresta de corte da ferramenta, definindo desta forma a classe do cavaco. A figura 2 representa esquematicamente essa zona de cisalhamento primário, simplificado por um plano, o qual é definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ e a direção da velocidade de corte (v_c).

Deslizamento das lamelas: durante o processo de penetração da ferramenta na peça, lamelas de cavacos são formadas e estas poderão se manter unidas ou se separar, dependendo da extensão da propagação da trinca. As propriedades do material e as condições de avanço e de velocidade de corte irão ditar quanto a permanência unida ou separada das lamelas, gerando cavacos contínuos ou descontínuos, de acordo com a extensão e a resistência da união entre as lamelas de material rompido.

Saída do cavaco: por causa do movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e rompida, o cavaco, sobre

a superfície de saída da ferramenta. Desta forma, o cavaco se forma, compreendendo várias lamelas justapostas, caracterizando, assim a usinagem.

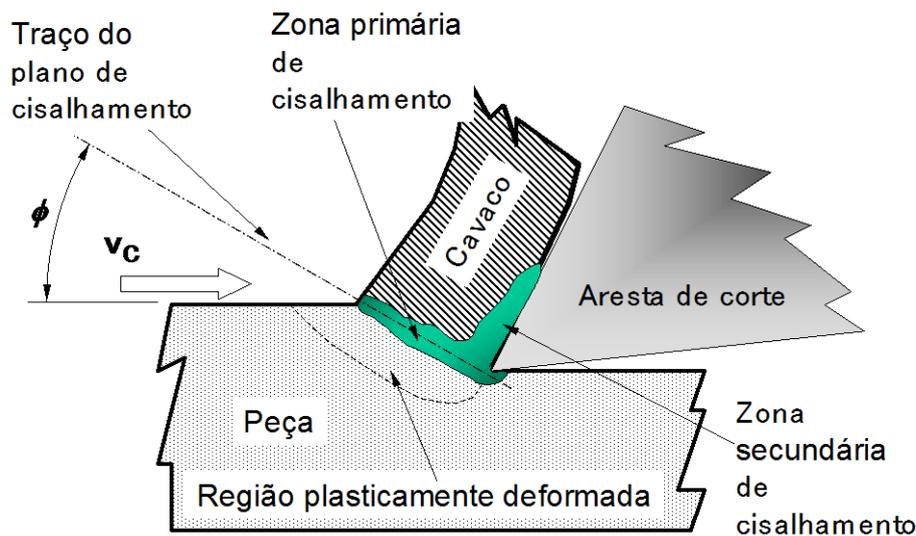


Figura 2. Planos de cisalhamento na formação do cavaco. Fonte: Machado *et al.* (2015).

2.1.1 Tipos de cavaco

Apesar de ser um subproduto da usinagem, o cavaco é de extrema importância para o processo, na realidade, sua formação é a essência do processo. Determinados tipos de cavaco podem causar algum problema à superfície da peça, mas por outro lado, anomalias no mesmo podem ser indicativos de problemas relacionados às condições da ferramenta de corte utilizada ou à qualidade do material usinado.

Os tipos de cavaco se classificam como:

1. CAVACO CONTINUO: caracterizado pelo seu grande comprimento, ocorre em metais dúcteis, quando submetidos a pequenos e médios avanços, com grande velocidade de corte e grandes ângulos de saída da ferramenta.

2. CAVACO DE CISALHAMENTO OU PARCIALMENTE CONTINUO: ocorre geralmente quando existe trinca, que ao se propagar pelo plano de cisalhamento primário, tem sua propagação interrompida pela elevada tensão de compressão neste plano. Como resultado, forma-se um cavaco não tão uniforme como o cavaco contínuo, nem fragmentado como o cavaco descontínuo, sendo, portanto, um meio termo.

3. CAVACO DESCONTINUO: é normalmente observado na usinagem de metais frágeis. Pode também ocorrer em materiais que não são tão frágeis, na usinagem à baixa velocidade de corte, grandes avanços e com pequeno ângulo de saída.

4. CAVACO SEGMENTADO: é mais comum ocorrer na usinagem de materiais pobres condutores de calor, sendo caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos, com pouca ou quase nenhuma deformação no seu interior. Ocorre porque o calor gerado não se difunde no material, permanecendo concentrado na região de cisalhamento primário, impedindo o encruamento nesta região, o que faz com que a deformação continue ocorrendo à medida que o cavaco vai se movimentando, sem iniciar nova deformação em um novo plano. Isto continua acontecendo até que o cavaco se afasta da aresta principal de corte da ferramenta, de maneira a não existir mais tensão suficiente para manter a deformação, momento em que novo plano de cisalhamento é iniciado, para formar novo segmento de cavaco. Na prática, este tipo de cavaco pode ocorrer na usinagem de qualquer material metálico, desde que a velocidade de corte seja suficientemente grande (acima de uma velocidade crítica) para que o tempo de dissipação de calor seja pequeno para evitar o encruamento, garantindo, assim o amolecimento localizado e a deformação continuada no plano de cisalhamento.

O controle do cavaco produzido é de grande importância, pois cavacos, como os contínuos, tendem a sair longos e oferecer grande perigo a quem opera a máquina, além de poderem se enrolar ao redor da peça, dificultando a operação.

2.1.2 Formas de cavaco

Além do tipo, existe outra maneira de classificar os cavacos, e isso é feito de acordo com sua forma. A classificação depende do tipo e pode ser alterada, dependendo das condições de corte. O aumento da velocidade de corte e do ângulo de saída tendem a produzir cavacos longos, na forma de fita. Por outro lado, o aumento do avanço e da profundidade de corte muda a forma do cavaco conforme Figura 3.

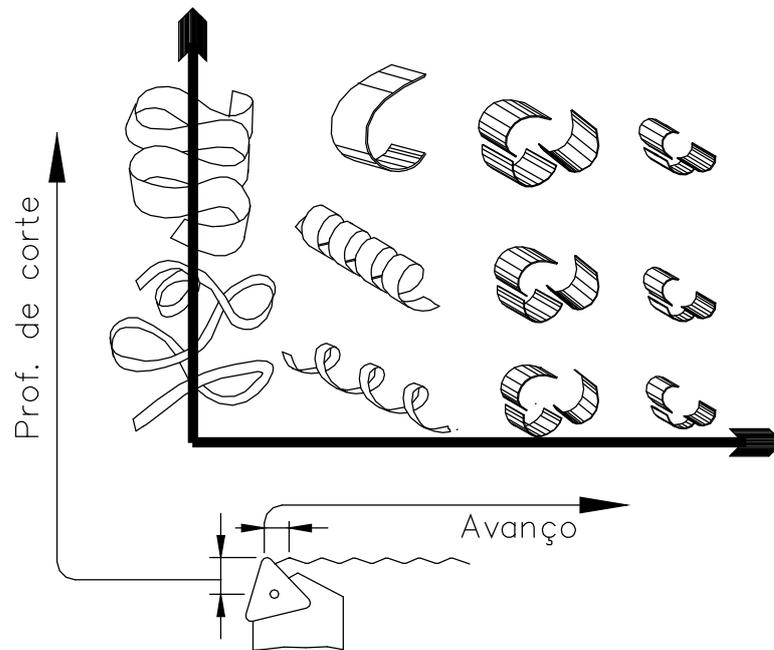


Figura 3. Variação do formato do cavaco em função das variáveis do processo. Fonte: Machado e Silva, (1999).

2.2 INTERFACE FERRAMENTA/CAVACO

Como visto, a formação do cavaco consiste em um processo cíclico ou periódico, com cada ciclo dividido em quatro eventos distintos, onde o último é o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. As condições nas quais esse escorregamento acontece têm influências importantes em todo o processo, principalmente no mecanismo de formação de cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o corte e, por consequência, na temperatura de corte e nos mecanismos e taxa de desgaste das ferramentas, influenciando no seu tempo de vida.

Segundo Trent (1963), em condições normais de corte, a pressão normal à superfície de saída da ferramenta é, geralmente, elevada, podendo atingir valores de até $3,5 \text{ GN/m}^2$ na usinagem de determinados aços. Essa tensão tem uma distribuição exponencial na superfície de saída da ferramenta, sendo máxima na aresta de corte. A elevada tensão em uma considerável porção da região de contato com a ferramenta promove uma condição de total união do cavaco com a ferramenta, caracterizando uma região de “aderência”. Em sua periferia, com a redução da tensão, há uma situação de contato não tão intensa como a aderência, mas ocorrendo apenas nos picos das irregularidades, caracterizando assim uma região de “escorregamento”. A Figura 4 mostra a zona de aderência (linha BC), que se estende da aresta de corte para dentro da superfície

de saída da ferramenta, e a zona de escorregamento (linha CD) que se desenvolve ao longo da periferia da aderência. Maiores detalhes dessas regiões serão dados na sequência, com uma abordagem do atrito nos corpos sólidos.

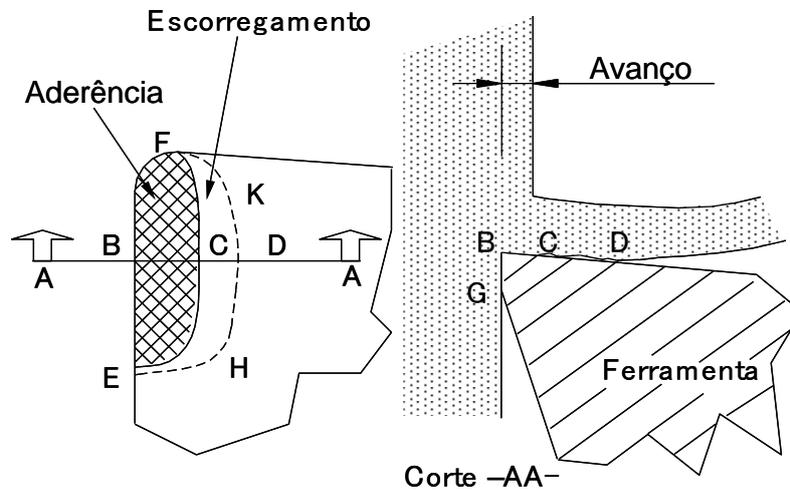


Figura 4. Zona de aderência e de escorregamento da ferramenta de corte. Fonte: Machado et. al., (2015).

Sobre certas condições, a zona de aderência pode ser suprimida, prevalecendo assim, apenas a condição de escorregamento ou zona de escorregamento. São situações onde alguns elementos são adicionados aos materiais sob corte (Pb, Bi, Se, Te, etc), que atuam como lubrificantes na interface cavaco-ferramenta. Se caracterizam por possuírem baixos pontos de fusão, onde as temperaturas na interface cavaco-ferramenta são altas o suficiente para fundirem esses elementos, atuando, dessa forma, na fase líquida, com resistência ao cisalhamento muito menor que do material da matriz da peça. O cisalhamento ocorre, nestes casos, no material líquido aderido, ao invés de ocorrer na zona de fluxo da matriz, facilitando enormemente a formação do cavaco.

2.3 ATRITO NO CORTE DE METAIS

Quando duas superfícies são colocadas justapostas e em eminente movimento relativo, a área de contato real (AR) é muito menor que a área de contato aparente (A),

devido às micro irregularidades presentes em qualquer superfície acabada. Os contatos acontecem apenas em alguns picos das irregularidades, como mostra a Figura 5.

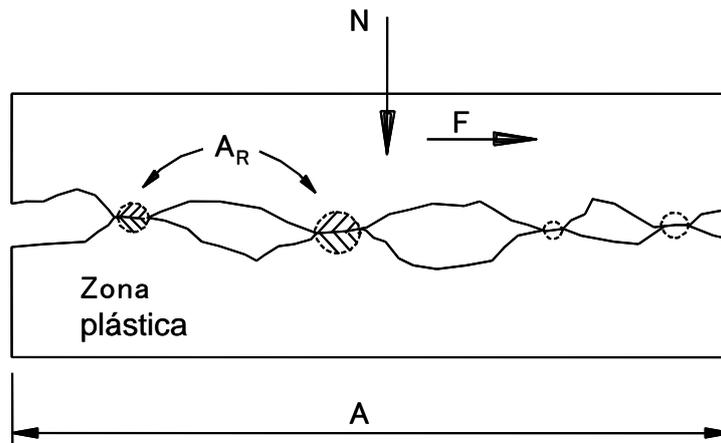


Figura 5. Área de contato entre duas superfícies com baixas cargas. Fonte: adaptado de Shaw *et al.*, (1960).

Com a aplicação de uma força normal (N), ocorre deformação plástica nos pontos de contato, aumentando a área de contato real (A_R) a fim de suportar essa nova adição de carga. Por consequência a força tangencial (F) (ou força de atrito) aumenta proporcionalmente, e o limite de proporcionalidade consiste no coeficiente de atrito μ , valendo neste caso a Lei de Atrito de Coulomb. Se a força normal for aumentada grandemente, vai ocorrer uma situação em que todos os picos das irregularidades se deformarão de maneira que a área real se iguale à área aparente ($A_R=A$). A força normal para que esse fenômeno aconteça é nomeada de “força normal limite” e, a partir desse valor, o aumento da força normal não mais influencia na força tangencial (ou de atrito), ou seja, a força tangencial deixa de ser proporcional à força normal, pois passa a ser constante e assume o valor suficiente para vencer à resistência ao cisalhamento do material menos resistente. Nessas condições, a lei de Atrito de Coulomb não tem mais validade.

Na Figura 6 são apresentados os três regimes de atrito em sólidos, em função do carregamento normal.

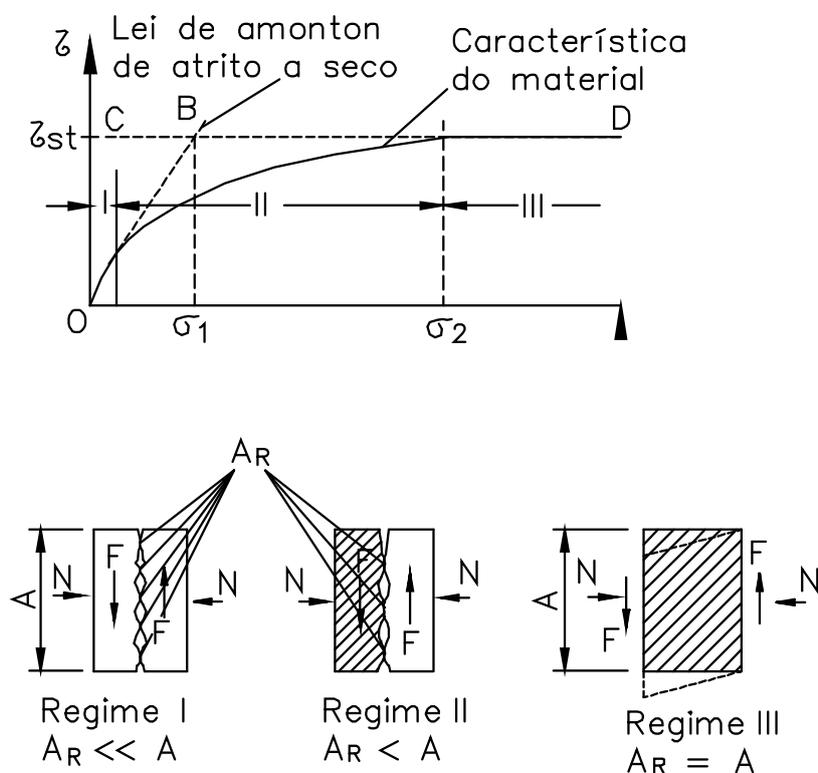


Figura 6. Os três regimes de atrito em sólidos. Fonte: adaptado de Shaw *et al.*, (1960).

No regime I, é válido a Lei de Atrito de Coulomb ($\mu = \tau/\sigma = \text{constante}$) e $A_R \ll A$. No regime III, é apresentado o cenário onde $A_R = A$, não existindo superfície livre entre os materiais, onde τ é independente de σ , este regime tem existência a partir do valor de tensão normal limite (σ_2). O regime II consiste na transição entre os regimes I e III, no qual o coeficiente de atrito diminui com o aumento da carga normal.

Zorev (1963) apresentou um modelo de distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta de corte, onde a tensão normal atinge seu valor máximo na extremidade da aresta e decresce, exponencialmente, até zero, no ponto onde o cavaco perde contato com a superfície de saída. A tensão cisalhante é constante na zona de aderência (assumindo o valor do limite de resistência ao cisalhamento do material da peça naquela região) e decresce, também exponencialmente, na zona de escorregamento até o valor zero, no ponto onde o cavaco perde contato com a ferramenta. Na região de aderência, $A_R = A$ e é válido o regime III. Na região de escorregamento, $A_R \ll A$ e o regime I prevalece. O modelo de Zorev é mostrado na Figura 7.

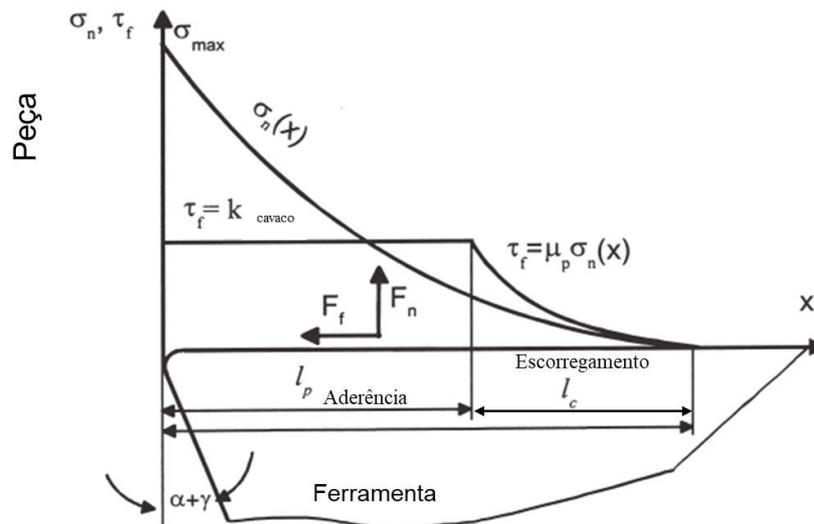


Figura 7. Modelo de distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. Fonte: Zorev *et al.*, (1963).

2.3.1 Zona de aderência

A zona de aderência (*seizure zone*) consiste na confirmação da presença do regime III na interface. O movimento na interface ocorre por cisalhamento dentro do material do cavaco. Há a formação de uma zona de cisalhamento intenso bem próximo, mas não necessariamente na interface, a qual é denominada como zona de fluxo (TRENT, 1963).

Segundo a literatura (TRENT, 1963), na zona de aderência existe um gradiente de velocidade iniciando-se com uma camada estacionária de material em contato com a ferramenta, se estendendo com uma espessura da ordem de 0,01 a 0,10 mm (espessura da zona de fluxo), onde a velocidade assume o valor da velocidade de saída do cavaco (V_{cav}). As “condições de aderência” devem ser adotadas como inevitáveis para a usinagem de, praticamente, todos os materiais (exceto para os de corte fácil), independente da ferramenta de corte utilizada. Elevadas tensões de compressão, grandes quantidades e elevadas taxas de deformação, que resultam em altas temperaturas na interface ferramenta/cavaco, bem como a pureza do material da peça em contato com a ferramenta, promovem ligações atômicas nessa interface, resultando em aderência. O mecanismo de deformação plástica na interface cavaco/ferramenta ocorre de dois modos distintos: a baixas velocidades de corte e avanço, com a formação de APC (aresta postiça de corte), através do movimento de discordâncias, acarretando em encruamentos; a elevadas taxas

de remoção de material na zona de aderência, as deformações cisalhantes estão confinadas a estreitas bandas de cisalhamento termoplástico (zona de fluxo).

2.3.2 Zona de escorregamento

Segundo Trent (1988), condições de escorregamento são observadas na periferia da área de contato entre o cavaco e a ferramenta. Nesse caso, a área real (A_R) é menor que a área aparente (A), comprovando a existência do regime I (SHAW *et al.*, 1960), onde também não está presente a zona de intenso fluxo de material, devido as fracas ligações internas dos materiais da peça e da ferramenta (apenas nos picos das irregularidades). O movimento relativo ocorre justamente na interface, por meio de um processo conhecido como *stick-slip*, no qual há um início de aderência seguido por escorregamento na interface.

A existência de condições de escorregamento na periferia da região de aderência ocorre devido às baixas tensões de compressão atuando nessas regiões, desfavorecendo a presença do regime III. Além desse fator, o acesso do oxigênio nesta região (possível devido aos vazios existentes nestas condições) favorece a formação de óxidos, que acabam por dificultar ligações metálicas fortes entre o cavaco e a ferramenta (Machado *et al.*, 2015).

2.4 ARESTA POSTIÇA DE CORTE (APC)

Segundo a literatura (TRENT, 1963), ao se usinar alguns materiais a baixas velocidades de corte, um fenômeno conhecido como APC – Aresta Postiça de Corte pode ocorrer na interface ferramenta/cavaco. É um fenômeno que envolve deformação plástica, encruamento e formação de micro trincas, fatores fortemente afetados pelas condições de corte e temperatura.

Na interface, a primeira camada do material da peça que se une à ferramenta por meio de ligações atômicas é endurecida por deformação (encruamento), incrementando, assim, seu limite de escoamento e, por consequência, a tensão de cisalhamento atuante acaba por se tornar insuficiente para romper tais ligações. As deformações não param por aí, continuando nas camadas superiores adjacentes, mais distantes da interface, até que são também encruadas. Com a repetição desse processo, uma sucessão de camadas forma

a APC, cujo tamanho não pode aumentar indefinidamente, então, quando o seu tamanho atinge um valor no qual a tensão de cisalhamento é suficiente para mudar a zona primaria de cisalhamento (a qual acontecia até então acima da APC), partes de sua estrutura são cisalhadas e arrastadas entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta e entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. A Figura 8 ilustra esse processo de maneira esquemática.

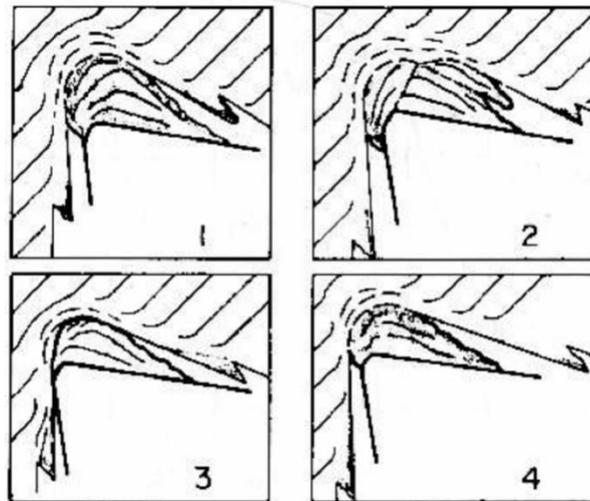


Figura 8. Ilustração da sequencia de eventos que ocorrem no processo de controle da altura da aresta posista de corte (APC). Fonte: adaptado (TRENT, 1963).

2.5 TEMPERATURA DE USINAGEM

Segundo a literatura (TRENT, 1988) grande parte da energia consumida durante a usinagem dos metais é convertida em calor próximo a aresta cortante da ferramenta e isso gera uma grande variedade de problemas técnicos e econômicos, causados direta ou indiretamente por conta desse aquecimento. O custo da usinagem depende da quantidade de remoção de material e pode ser reduzido ao se aumentar a velocidade de corte e/ou a velocidade de avanço, entretanto, existem limitações para essas velocidades, acima das quais a vida da ferramenta é drasticamente diminuída, elevando-se assim os custos.

A vida da ferramenta é um item de extrema importância do ponto de vista econômico, pois depende muito da temperatura atingida na interface ferramenta/cavaco. O calor gerado na interface ferramenta/cavaco que é conduzido para a ferramenta provoca um aumento da temperatura desta, nas redondezas da ponta de corte. Devido a esse aumento, a dureza ou a resistência ao cisalhamento do material da ferramenta diminui,

limitando, assim uma velocidade máxima suportável. Se este valor é excedido, a aresta cortante irá se deformar (FERRARESI, 1970).

A quantidade de calor gerado na usinagem aumenta diretamente com a velocidade de corte e com a principal componente da força de usinagem (força de corte) (MACHADO, *et al.*, 2015).

A energia envolvida no processo de formação de cavacos é consumida para cisalhar o material nas três regiões distinguidas ilustradas na Figura 9. São elas: a zona de cisalhamento primária (região A, na Figura 9); na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, ou zona secundária de cisalhamento (região B e C, na Figura 9); e na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta, ou zona terciária de cisalhamento (região D, na Figura 9). O calor na zona primária de cisalhamento é originado do trabalho de cisalhamento interno do material, enquanto que nas duas outras zonas o calor é originado do atrito e do cisalhamento interno causados pela aderência entre as superfícies do cavaco e da peça com a ferramenta, respectivamente.

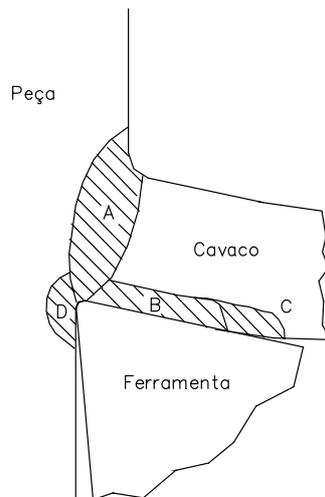


Figura 9. Regiões onde o calor é observado durante a formação de cavacos. Fonte: Machado et al., (2015)

O calor gerado nos planos de cisalhamento pode ser considerado como benéfico para a usinagem, devido ao fato de ao aumentar a temperatura nas zonas de cisalhamento primária e secundária a resistência mecânica do material da peça reduz, facilitando a continuidade da deformação plástica necessária para formar o cavaco. O calor produzido na zona secundária de cisalhamento tem influência maior sobre o desempenho da ferramenta e é praticamente fator limitante para a taxa de remoção de material, especialmente por meio do aumento da velocidade de corte. O contato entre a superfície

de folga da ferramenta e a peça (zona terciária) vai ocorrer mesmo no caso de ferramentas sem desgaste de flanco, pois no processo formação da nova superfície haverá uma recuperação elástica do material, garantindo contato com a ferramenta, contribuindo para o aumento da temperatura da interface peça-ferramenta.

O calor gerado depende das propriedades dos materiais da peça e da ferramenta, da geometria da ferramenta e das condições de corte. O calor se eleva com o aumento da taxa de remoção de material, seja por meio do aumento da velocidade de corte, da profundidade de corte ou do avanço. Entre esses parâmetros a velocidade de corte é a que mais influencia, principalmente em velocidades moderadas. No caso de usinagem em altíssimas velocidades de corte, o calor gerado no plano de cisalhamento primário flui praticamente todo com o cavado, com praticamente nenhuma dissipação de calor para a peça ou ferramenta, considerado como um corte “adiabático” (MACHADO, *et al.*, 2015). Em casos de velocidades de corte baixas e moderadas, é necessário entender os fatores que influenciam a geração de calor, seu fluxo e a distribuição de temperatura na ferramenta, no cavaco e na peça, próxima à aresta de corte, por dois motivos: a temperatura afeta as propriedades mecânicas do material da peça e, devido a isso, a interação das forças entre ferramenta e peça; a temperatura tem grande influência no desgaste da ferramenta, tanto na superfície de saída como na de folga. Devido às elevadas temperaturas na ferramenta, existem limites para a velocidade de corte e avanço (MACHADO, *et al.*, 2015).

Com o incremento da temperatura na região de corte, haverá o aquecimento da peça, ocorrendo dilatação térmica desta, o que afeta as suas dimensões durante a usinagem. Isso prejudica a precisão dimensional, podendo provocar refugos.

Uma parte do calor gerado na zona de cisalhamento primária é dissipado pelo cavaco e a outra parte pela peça, dependendo da velocidade de corte.

A temperatura do cavaco derivada do calor gerado na zona de cisalhamento primária não é de grande influência na temperatura da ferramenta, pois a temperatura na zona de cisalhamento secundária, derivada principalmente do calor gerado na zona de fluxo, que está em contato com a ferramenta de corte, é maior e não há, portanto, como haver fluxo de calor de uma região mais fria para a mais quente. Além disso, o tempo que o cavaco passa sobre a superfície de saída da ferramenta é muito pequeno, não sendo suficiente para troca efetiva de calor na região. Entretanto, com a zona de fluxo, o tempo de contato é maior, havendo tempo para a condução de calor para a ferramenta, tornando-

se a principal fonte de calor responsável pelo aumento de temperatura na ferramenta de corte.

A temperatura na interface cavaco-ferramenta pode atingir valores superiores a 1.100°C durante a usinagem de aços endurecidos e também em algumas ligas de níquel (dependendo das condições de corte), entretanto a faixa normal de temperatura média do cavaco varia de 500°C a 650°C .

A temperatura na região de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça (zona terciária), assim como a temperatura da zona de fluxo, é influenciada pelo aumento da velocidade de corte, com isso existirá um limite na velocidade de corte para cada par ferramenta/peça.

As elevadas temperaturas nas ferramentas de corte influenciam em vários aspectos na usinagem, não apenas aceleram os mecanismos de desgaste termicamente ativado, como também diminuem o limite de escoamento do material da ferramenta. Na presença da zona de fluxo, as taxas de deformação são muito altas e complexas, o que dificulta a precisão dos valores de temperatura. Grandes deformações e altas taxas de deformação, sem encruamento do material na mesma proporção, apenas ocorrem com o amolecimento adiabático causado pela elevação da temperatura, sendo um processo similar ao da formação de cavaco segmentado. Com isso, a temperatura na interface cavaco-ferramenta é decorrente da quantidade de material que passa pela zona de fluxo, variando com o material da peça.

As condições da interface cavaco/ferramenta tais como aderência, escorregamento ou aresta postiça de corte, são os fatores mais importantes a serem considerados em relação à temperatura da ferramenta de corte. Na condição de aderência, a zona de fluxo é a fonte efetiva de calor, existindo três parâmetros metalúrgicos que influenciam diretamente a temperatura da ferramenta, segundo Trent e Wright (2000):

- O ponto de fusão do principal elemento químico do material da peça, pois é ele quem dita qual será a maior temperatura da interface ferramenta/cavaco para qualquer velocidade de corte.
- Os elementos de liga que elevam a resistência da peça, acabam por aumentar a temperatura da interface cavaco-ferramenta, para qualquer taxa de remoção de material.
- A existência de fases de baixa resistência ao cisalhamento na interface, que podem reduzir a temperatura.

Para usinagem com ângulos de folga pequenos ($<2^\circ$), ou caso ocorra desgaste de flanco em proporções consideráveis, a interface peça/superfície de folga da ferramenta se torna a terceira fonte importante de calor, com a presença de outra zona de fluxo, o que gerará altas temperaturas na superfície de folga, podendo levar a ferramenta de corte ao colapso.

2.5.1 Métodos de medição de temperatura na usinagem

De acordo com a literatura (BYRNE, 1987) para se avaliar o aumento de temperatura nas zonas de corte, diversas técnicas foram desenvolvidas, e a maioria delas é utilizada para medir a temperatura da ferramenta. Os métodos práticos mais utilizados para a medição da temperatura na região de formação de cavacos são:

- Medição direta por termopares inseridos.
- Medição da força termoelétrica entre a ferramenta e a peça (método do termopar ferramenta/peça).
- Medição por radiação de calor com sensores infravermelhos.
- Medição utilizando vernizes termosensíveis.
- Medição por técnicas metalográficas.
- Medição usando pós químicos.
- Medição usando o método do filme PVD.

A medição da temperatura na interface cavaco-ferramenta pode se apresentar como um desafio, por se tratar de uma região muito pequena, de difícil acesso para a utilização de sensores de temperatura, envolvendo grande dinâmica no processo de saída do cavaco.

O método utilizado para a medição de temperatura nesta dissertação foi o do termopar ferramenta/peça, baseado no efeito Seebeck, que rege as leis dos termopares. O dispositivo usado foi desenvolvido por Favaretto (2017) cujos detalhes serão apresentados adiante, no capítulo referente ao procedimento experimental.

2.6 FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte têm ganhado espaço nos processos de usinagem, devido às melhorias significativas no sistema tribológico entre as superfícies de contato da ferramenta com o cavaco e com a peça (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001).

2.7 FUNÇÕES DO FLUIDO DE CORTE

Segundo a literatura (MACHADO *et al.*, 2015) as principais funções dos fluidos de corte são:

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

Quando o fluido é constituído a base de água, a dissipação de calor, ou seja, a refrigeração é mais efetiva que a lubrificação. O fluido de corte tem a eficiência menor em reduzir a temperatura com aumentos da velocidade de corte e da profundidade de corte.

O fluido, como lubrificante, tende a formar um filme entre a ferramenta e o cavaco, apenas na zona de escorregamento, o que diminui o contato direto entre os mesmos nesta região. O lubrificante não tem acesso na zona de aderência, pois, devido as altas tensões normais envolvidas, não existem espaços para penetração do fluido (TRENT e WRIGHT, 2000).

Segundo Machado *et al.* (2015), a penetração do fluido de corte pode também restringir o caldeamento (micro soldagem) de cavacos e peça na superfície de saída e de folga da ferramenta, respectivamente, evitando ou reduzindo as dimensões da APC (aresta postiça de corte), principalmente quando são incorporados ao fluido aditivos específicos, e diminuindo o desgaste de flanco da ferramenta.

A utilização do fluido de corte em condições de baixas velocidades de corte tem a finalidade de lubrificar a superfície, reduzindo o atrito e assim reduzindo a dimensão ou evitando o aparecimento de APC (aresta postiça de corte).

Na utilização do fluido de corte em altas velocidades de corte, as condições não são favoráveis para a penetração e efetiva ação lubrificante nas interfaces peça/ferramenta/cavaco. Isso se deve às altas tensões que se apresentam nessas interfaces e ao maior fluxo de cavaco, na direção contrária à de penetração do fluido, dificultando o acesso do mesmo.

2.8 CLASSIFICAÇÕES DOS FLUIDOS DE CORTE

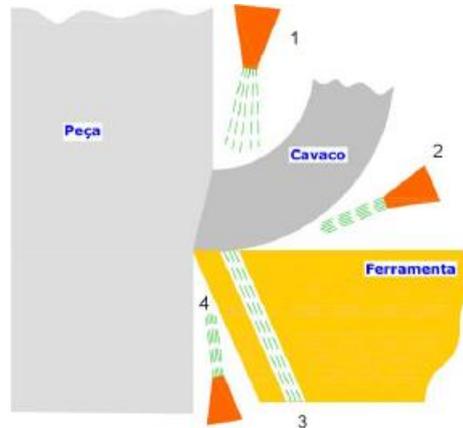
Os agentes lubrificantes podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Os fluidos de corte líquidos são os mais importantes e utilizados, pois apresentam excelentes propriedades refrigerantes e lubrificantes. Segundo Shaw (1968), entre os gasosos, os mais comuns são o oxigênio e o vapor de água presentes na atmosfera, os quais têm como função a refrigeração, mas podem formar óxidos que facilitam o processo, mas diferente dos sólidos (grafite, bissulfeto de molibdênio, etc.) que têm como função principal só lubrificação.

Os fluidos de corte se dividem em três subgrupos:

- Óleos de corte integrais (puros): óleos minerais (derivados do petróleo), óleos graxos (de origem animal ou vegetal), óleos sulfurados (enxofre) e clorados (cloro) os quais são agentes EP (extrema pressão).
- Óleos emulsionáveis: em forma de emulsão, formados por uma mistura bifásica de óleo e água, com a presença de emulgadores, que são aditivos que atuam para garantir uma mistura homogênea estável. São formados a base de óleos minerais, graxos, agente EP (cloro, fósforo, enxofre ou cálcio), além dos emulgadores e água. Nesta classe ainda se encontram os fluidos denominados de semi-sintéticos ou microemulsões, formados por grandes quantidades de produtos químicos e de apenas 5 a 50% de óleo, miscíveis na água, com a presença de grandes quantidades de emulgadores.
- Fluidos sintéticos ou químicos: Compostos por misturas de água e agentes químicos (nitritos, fosfatos, boratos, amina, agentes umectantes, glicóis, germicidas e sabões), onde os agentes se combinam quimicamente com a água, formando soluções químicas monofásicas.

2.9 MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE

A Figura 10 apresenta as quatro direções de aplicação dos fluidos de corte possíveis.



- (1) Aplicação convencional de fluido na forma de jorro à baixa pressão (sobre-cabeça);
- (2) Aplicação de fluido entre a superfície de saída da ferramenta e a parte inferior do cavaco;
- (3) Aplicação por dentro da ferramenta de corte;
- (4) Aplicação do fluido entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

Figura 10. Direções de aplicação do fluido de corte. Fonte: SILVA et al., (2006).

A primeira direção é a mais empregada, por ser a de mais fácil aplicação. A segunda direção oferece maior poder de penetração e velocidade. A terceira direção exige uma ferramenta de corte especial para sua aplicação, mas também desenvolve bem seu papel, entregando o fluido na região de contato cavaco-ferramenta, exigindo um projeto adequado, para evitar o entupimento, devido às altas tensões compressivas. A quarta direção é entre a superfície de folga e a ferramenta, exigindo mangueiras flexíveis longas para poder direcionar o fluido corretamente nesta região. Esta direção refrigera a superfície da ferramenta, diminuindo o desgaste de flanco.

Além da opção de se alterar a direção da aplicação do fluido, também se pode alterar a forma como se aplica, sendo elas:

- Jorro de fluido à baixa pressão
- Pulverização, ou MQL (mínima quantidade de lubrificante).
- Jato de fluido à alta pressão.

O primeiro sistema é o mais utilizado pela sua simplicidade. A pulverização tem maior poder de penetração, podendo ser mais efetivo na lubrificação. O terceiro método é mais engenhoso, porém, bons resultados foram obtidos com o seu emprego

(MACHADO, 1990).

Com a necessidade de reduzir o consumo de fluidos de corte, a técnica MQL tem sido muito investigada. Nesta técnica o fluido é aplicado em volumes muito baixos chegando a 10 ml/h. Normalmente, eles são aplicados juntamente com um fluxo de ar (método da pulverização), e direcionados contra a saída do cavaco, ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

Machado e Wallbank (1997) utilizaram água e uma emulsão de óleo mineral utilizando um venturi para misturar esses componentes no fluxo de ar e aplicou o jato da mistura contra a saída do cavaco no torneamento de aço AISI 1045 (ABNT 1020). Houve uma redução nas componentes de forças, principalmente em baixas velocidades de corte e alto avanço.

No terceiro sistema, o fluido é aplicado contra a saída do cavaco em alta pressão, atuando como um eficiente quebra-cavacos, com maior poder de penetração, reduzindo a temperatura e os esforços de usinagem, podendo aumentar a vida da ferramenta (MACHADO e WALLBANK, 1994).

2.10 TEXTURAS EM FERRAMENTAS DE CORTE

Superfícies texturizadas têm reportado uma melhora tribológica no desempenho de contatos, reduzindo o atrito e até mesmo aumentando a resistência da superfície em alguns casos. No processo de usinagem, o uso de ferramentas de corte texturizadas tem mostrado uma redução no atrito entre a ferramenta e o cavaco, levando em alguns casos a não utilização de lubrificantes, em outros a uma maior ancoragem do fluido lubrificante na zona de escorregamento, podendo aumentar a vida da ferramenta de corte (Olleak *et al.*, 2017).

2.10.1 Tipos de textura

De acordo com a literatura (Szymański *et al.*, 1990) os tipos básicos de textura são classificados como:

- Ponto: Consiste no menor diâmetro que o feixe do laser consegue focalizar, chamado também de spot, podendo ser gerado de maneira contínua ou pulsada.
- Linha: Menor largura possível que o feixe de laser consegue gerar quando descrito um movimento contínuo.
- Anel: Normalmente gerado de maneira pulsada, onde o diâmetro e a espessura dependem dos parâmetros do laser.

A Figura 11 apresenta os tipos básicos de textura e suas variações:

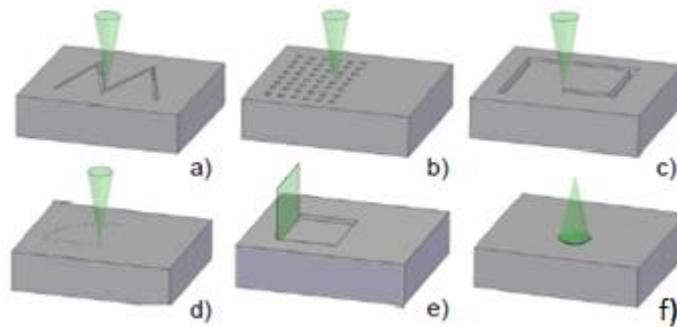


Figura 11. Tipos de textura: a) sequencial, b) ponto (spot), c) forma livre linha, d) forma livre ponto, e) tira, f) ilha. Fonte: adaptado de Szymański *et al.* (1990).

As texturas podem também ser classificadas de acordo com a orientação que está disposta na ferramenta, ilustrado na Figura 12.

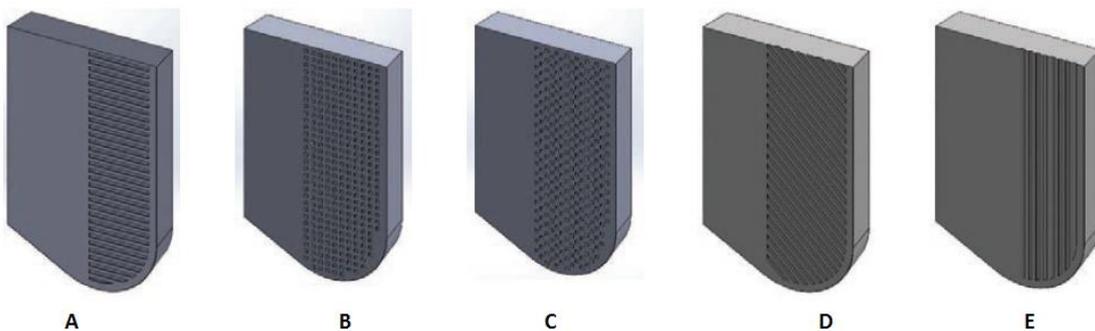


Figura 12. Tipos de orientação de textura: A) Perpendicular, B) Pontos, C) Diagonal e com pontos, D) Diagonal 45°, E) Paralelas. Fonte: adaptado de Olleak *et al.* (2017).

Cada uma das orientações apresenta um efeito diferente na ferramenta, influenciando o atrito, as forças de usinagem, a ação de ancoragem de fluido, e, até mesmo o acabamento final da peça usinada.

2.10.2 Métodos de obtenção das texturas

Existem várias formas pelas quais as micros / nano-texturas podem ser fabricadas na superfície de uma ferramenta de corte, dentre estas incluem:

- Texturização baseada em micro usinagem a laser.
- Texturização baseada em micro usinagem por descarga elétrica (EDM).
- Texturização baseada em micro-moagem.
- Texturização baseadas em usinagem de feixe de íons.

A texturização por Micro-EDM fornece alta precisão (até 5µm) e baixa rugosidade da superfície. Esta técnica simples foi testada por Koshy *et al.* (2011), na texturização de ferramentas de corte e com assistência de vibração de alta frequência por Li *et al.* (2016), o qual foi relatado como eficiente e razoável em termos de tempo de usinagem.

A usinagem a laser é um método de fabricação amplamente utilizado para texturas de superfície. Usando texturização a laser, Li *et al.* (2009) fabricaram padrões de texturas de pontos em ferramentas de metal duro (WC / Co) de 70 µm de diâmetro usando um laser femtossegundo. Kümmel *et al.* (2015) fabricaram micro-texturas em linhas paralelas e perpendiculares, com largura de 50 µm e profundidade de 20 µm na superfície de ferramentas de corte de metal duro (WC / Co). Xing *et al.* (2014) também fabricaram texturas em linhas paralelas, perpendiculares e onduladas em micro e nano escalas em insertos de cerâmica mista (Al₂O₃ / TiC), com comprimento foi de 40-50 µm, o espaçamento de 150 µm e a nano textura tinha o comprimento de 350-400 nm, com profundidade de 120-150 nm, e espaçamento de 750 nm.

A maioria dos trabalhos de texturização para aplicação tribológica, incluindo em ferramentas de corte, encontrada na literatura, usa lasers de nanosegundos (SEGU, *et al.*, 2013; SHUM *et al.*, 2013; YOUQIANG *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2015). Pulsos longos produzem, inevitavelmente, uma zona afetada pelo calor e uma camada de material fundido e resolidificado com detritos na área processada. O uso de pulsos com durações de dezenas ou centenas de femtosegundos pode reduzir, ou praticamente eliminar, esses efeitos, deixando a superfície processada com características físicas e mecânicas quase inalteradas.

2.11 FUNDAMENTOS DO LASER

O processo de geração de um feixe laser (“Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation”), consiste em uma amplificação da luz por emissão estimulada. Nos dias de hoje, existem inúmeros tipos de laser, e devido a isso, a obtenção de um resultado desejado em um processo, seja ele de fabricação ou com outra finalidade, implica em uma escolha minuciosa do sistema a laser, além da devida compreensão da física envolvida no processo.

Todos os “materiais” existentes são formados por sistemas atômicos, geralmente em estado de equilíbrio, que são caracterizados por níveis de energia, e onde a maioria encontra-se em um estado de mínima energia. Com a absorção de energia externa ao sistema ocorre uma mudança do estado de energia deste sistema. De maneira geral, este novo estado se manifesta em aumento de temperatura, através do aumento de vibração dos átomos (ou íons, ou moléculas) ou através de uma transição eletrônica deste átomo (íon ou molécula). Este último caso pode ser entendido como um salto transitório de um elétron de um átomo estável para um estado excitado ou o vice-versa.

O postulado de Niels Bohr explica:

- a) Os elétrons se movimentam ao redor do núcleo em movimentos circulares, sem haver emissão de energia por eles.
- b) Quando o elétron transita de uma órbita para a outra, em um átomo livre, ocorre a absorção ou emissão de uma determinada quantidade de energia, conhecida por “fóton”.

A menor porção de energia com a qual um elétron precisa para mudar de nível de energia é denominado “quantum”.

Quando um elétron está em um nível de energia mais elevado que o seu nível básico, ocorre uma necessidade natural a uma transição espontânea para o nível básico, ou seja, o seu estado estável, fundamental. Essa transição é seguida da emissão do excesso de energia na forma de fótons, chamada de emissão espontânea.

O laser por outro lado consiste em emissão estimulada. A emissão estimulada sempre é acompanhada de absorção e emissão espontânea.

A emissão estimulada consiste em: um elétron excitado (com o nível de energia superior ao normal) possui uma tendência natural para ir ao nível de mais baixa energia, mas como essa mudança leva um certo tempo, um agente externo pode acelerar. O fóton é responsável pela transição do elétron a um nível energético menor.

Assim, um fóton estimula o elétron excitado a voltar ao seu nível normal, o qual ao voltar ao estado de baixa energia, emite um fóton. Neste processo, resulta como produto o fóton que estimulou intacto, juntamente com o fóton gerado pelo elétron, sendo os dois idênticos, com a mesma fase e direção.

O processo descrito acima pode ser ampliado inúmeras vezes, mas para que isso ocorra é necessário que o nível excitado possua mais elétrons que o estado de estabilidade, fenômeno conhecido como inversão de população. A amplificação da luz pode chegar a níveis de energia onde, em escala atômica, o feixe gerado é capaz de agitar muito fortemente os íons de qualquer elemento que absorva luz, gerando fenômenos tais como fundição, ablação ou evaporação, de acordo com a intensidade utilizada e com altíssima precisão.

Um laser é composto basicamente por:

- Um meio ativo para que a luz seja amplificada através da emissão estimulada de radiação.
- Uma fonte de excitação para manter a inversão de população.
- Uma cavidade óptica.
- Uma superfície semi-espelhada, a qual permita que uma certa quantidade de energia do feixe passe e possa ser usada nas aplicações.
- Sistema de potência.
- Sistema de controle.
- Sistema de refrigeração.

2.11.1 Interação Laser matéria

Segundo Ready e Oliveira (2006), a energia concentrada na forma de um feixe de luz, quando focalizada sobre uma superfície divide-se em três parcelas, sendo que, uma parte é refletida, uma absorvida e a terceira parte é conduzida através da matéria. A energia absorvida pelo material no ponto focal (também chamado de “Spot”) dependendo basicamente de:

- Capacidade de absorção do material: a absorção da energia do laser pelo material depende do fluxo de calor no mesmo, dependendo principalmente das características do material, tais como a condutividade térmica, o calor

específico, densidade e difusividade térmica. O aumento da temperatura do material aumenta a sua capacidade de absorção.

- Refletividade da superfície: Consiste na quantidade de energia refletida pelo material, a qual depende da composição, acabamento e estado de oxidação da superfície.
- Propriedade termodinâmica do material: devido a absorção da energia fornecida pelo laser, o material está sujeito a sofrer alterações do seu estado físico. Isso se deve ao aumento de temperatura, levando a fusão e até mesmo a vaporização do material.

No laser pulsado, os parâmetros que interferem no processamento do material são:

- Potência média do laser: Normalmente a potência média varia de 100 W até mais de 1kW (alta potência);
- Energia do pulso: É medida com um detetor, ou também pode ser calculada como a razão entre a potência média do laser (W) e a frequência de pulsação do laser (Hz). Varia entre 10^{-9} J até valores acima de 1 J;
- Tempo do pulso: A duração do pulso varia de femtosegundos (fs) (10^{-15} s) até mais de 1(s);
- Diâmetro do feixe de laser: Varia de valores inferiores a 1 (μm) até superiores a 10 (mm);
- Intensidade, irradiância ou densidade de potência do laser: é dada pela equação $E/(\tau \cdot \pi \cdot r^2)$, sendo que, E é a energia do pulso, τ é o tempo do pulso e r é o raio do feixe de laser. Normalmente, a intensidade do laser é indicada em W/cm^2 .

A energia do laser é proporcional a sua intensidade. Dumitru (2005) afirma que o controle da intensidade do laser pode causar desde mudanças na superfície do material (aumento da dureza superficial, revenimento), remoção de material em pequenas escalas (texturização, micro modelagem) e até causar a remoção de material em escalas maiores (furação, corte).

De acordo com Allmen (1987), a texturização a laser consiste em um feixe que transfere grande parte da sua energia para o material (peça), que quando absorvida gera o aumento da temperatura local, causando mudanças de fase (vaporização, fusão) da superfície, que por consequência, provoca ablação do material. A ablação ocorre no ponto focal, onde suas dimensões e geometria dependem dos parâmetros do processo (tais como

intensidade, energia e outros). A distribuição destas estruturas ablacionadas formam uma superfície texturizada.

A texturização a laser tem como vantagem a precisão. Esse feixe pode se movimentar em relação a superfície e desenvolver vários tipos de texturas, portanto.

2.11.2 Variáveis do processo de texturização a laser

As variáveis do processo de texturização a laser se dividem em as que podem ser controladas no equipamento a laser e as que dependem da interação laser-matéria, as quais dependem basicamente das propriedades do material a ser texturizado. As propriedades do material que influenciam no processo são: a condutividade térmica, o calor específico, a densidade de massa e o coeficiente de absorção do material (o qual está inicialmente associado a qualidade da superfície e a cor do material).

Após o início do contato do pulso do laser com a superfície do material, a temperatura aumenta, levando a uma mudança de fase do material de sólido para líquido, modificando o coeficiente de absorção da área irradiada.

As variáveis controláveis no equipamento laser são: a potência do laser, a frequência de pulso (para o laser pulsado), o tempo do pulso, a velocidade de varredura, o deslocamento transversal e o diâmetro do foco incidente no material. Alterações nessas variáveis levam ao controle de:

Profundidade de penetração térmica do feixe de laser: Consiste na distância que sofreu influência da transferência de calor durante um pulso do laser. A profundidade de penetração térmica (l) depende: da duração do pulso (τ), da condutividade térmica (k), da densidade de massa (ρ) e do calor específico do material (c), segundo a equação 2.1.

$$l = 2 \sqrt{\frac{k}{\rho c}} t \quad [2.1]$$

Em pulsos na ordem de duração de fs (femtosegundos), mais curtos do que o tempo de termalização, a transferência de energia ocorre, em primeira instância, em condições instáveis e em uma camada superficial, onde são gerados elétrons "quentes", enquanto os átomos da rede cristalina não sofrem perturbações de energia. Neste

momento a remoção de energia ocorre por vários fatores não térmicos, tais como, esforços locais induzidos ou explosões de Coulomb (devido as forças de colisões entre os elétrons do sólido, as moléculas são instantaneamente transformadas em cachos de componentes atômicos, os quais, se separam drasticamente sob a influência de sua mutua repulsão de Coulomb). Caso ainda reste energia nos elétrons quentes após o pulso do laser, ela será transferida à rede cristalina durante o tempo de termalização. Quando a fluência incidente é elevada, prevalece o processo térmico, pois uma grande parte da energia permanece nos elétrons quentes e é transferida à rede cristalina depois da incidência do feixe (DUMITRU *et al.*, 2005)

Modo transversal eletromagnético do feixe laser: durante a geração do feixe laser pode ocorrer um ou mais modos transversais eletromagnéticos representados normalmente pelas letras TEM_{lmn} onde os índices l, m e n especificam o número de nós do campo eletromagnético nos eixos X, Y e Z, respectivamente. O sub-índice n é descartado na maioria das vezes, pois o número de eixos longitudinais é muito maior, quando comparado com os outros dois eixos. Para o processamento de materiais, o modo normalmente utilizado é o TEM_{00} devido à menor divergência e menor diâmetro do ponto focalizado levando a uma intensidade mais elevada (ARROYO, 2009).

A equação 2.2 descreve, matematicamente, a distribuição espacial da intensidade do laser absorvida na superfície do alvo.

$$I(x, y, t) = (1 - R)I_o(t)e^{-\frac{(x^2+y^2)}{r^2}} \quad [2.2]$$

A energia transmitida à profundidade “z” é descrita pela equação 2.3.

$$I(x, y, z, t) = AI_o(t)e^{-az}SP(x, y) \quad [2.3]$$

Onde,

r = raio do feixe;

A = (R-1) = absorção do material irradiado;

R = refletividade;

z = Profundidade de transmissão da energia;

$I_o(t)$ = Distribuição temporal da intensidade laser;

SP = Intensidade espacial da intensidade do laser.

(x,y,z) = Índices do modo

t = tempo

A Figura 13 apresenta a relação entre um modo Gaussiano e a distribuição de intensidade sobre o alvo em um instante t.

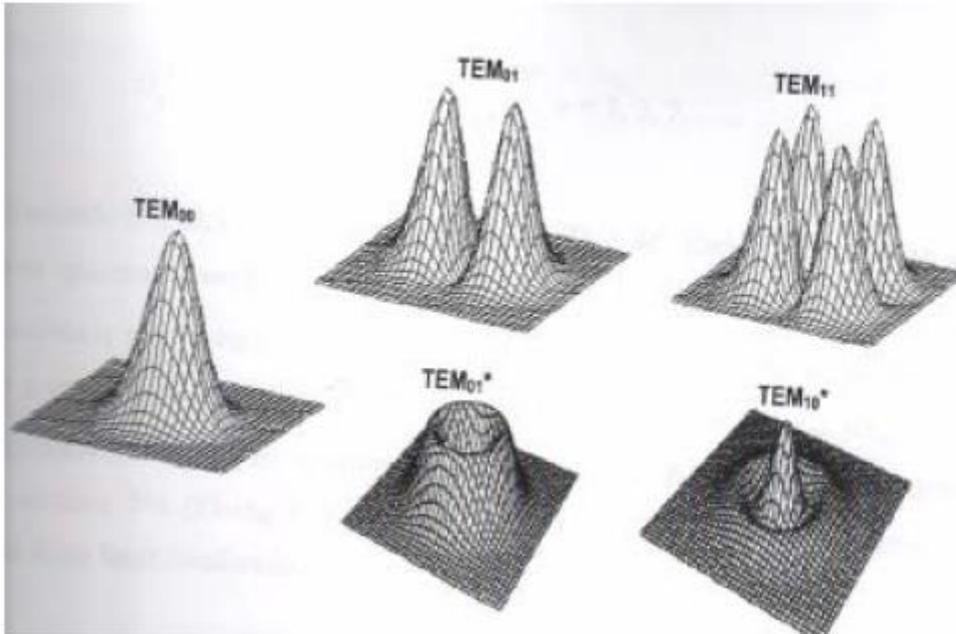


Figura 13. Distribuição de intensidade em feixes gaussianos (LIMA, 2006; RIVA, 2007).

Comprimento de onda da radiação: O comprimento de onda λ é associado à frequência de oscilação eletromagnética pela relação $c = \lambda * \nu$. A frequência ν , característica da radiação a laser, varia de material para material, pois depende da frequência do campo energético.

Ângulo de divergência do feixe laser: O diâmetro do feixe muda de tamanho na sua propagação dentro e fora da cavidade, devido a difração. O mínimo diâmetro em que um feixe gaussiano TEM₀₀ pode ser focalizado é dado pelo seu limite de difração λ/π . O ângulo de divergência θ é dado pela equação 2.4.

$$\theta = \frac{2 \lambda}{\pi D_0} \quad [2.4]$$

Parâmetro de qualidade do feixe laser: O limite de difração é dado por λ/π determina o parâmetro de qualidade, representado pelo índice M², conforme Equação 2.5.

Sendo que M^2 representa o quanto uma distribuição de intensidade de um feixe laser está longe de uma gaussiana. $M^2 = 1$, isso significa que o feixe tem uma distribuição verdadeiramente gaussiana. Maior que isto a gaussiana está distorcida.

Feixe com $M^2 = 1$ pode ser focalizado em seu menor diâmetro possível, que é dado pelo limite de difração. $M^2 > 1$ significa que o ponto focal terá um diâmetro maior que isto e a intensidade será menor.

Um feixe de alta qualidade (M^2 de baixo valor) apresenta os seguintes benefícios no processamento de materiais:

- Quanto menor o diâmetro focal, melhor a eficiência do processo;
- Menor energia térmica para o material;
- Soldas e cortes com largura menor.

$$M^2 = \frac{\pi D_0}{\lambda} \quad [2.5]$$

Focalização do feixe laser: É obtido matematicamente pela equação 2.6.

$$f - \text{Number} = \frac{f}{\phi}; d_f = 2,44 \frac{\lambda f}{\phi} M^2; Z_f = 2(f - \text{Number})d_f \quad [2.6]$$

Onde,

f = distância focal;

ϕ = diâmetro do feixe ou da abertura do feixe

Z_f = profundidade do foco (distância até 5% de desfocalização)

$f - \text{Number}$ = Número da focal (define a facilidade para focar o feixe).

A Figura 14 mostra as características geométricas do feixe de laser.

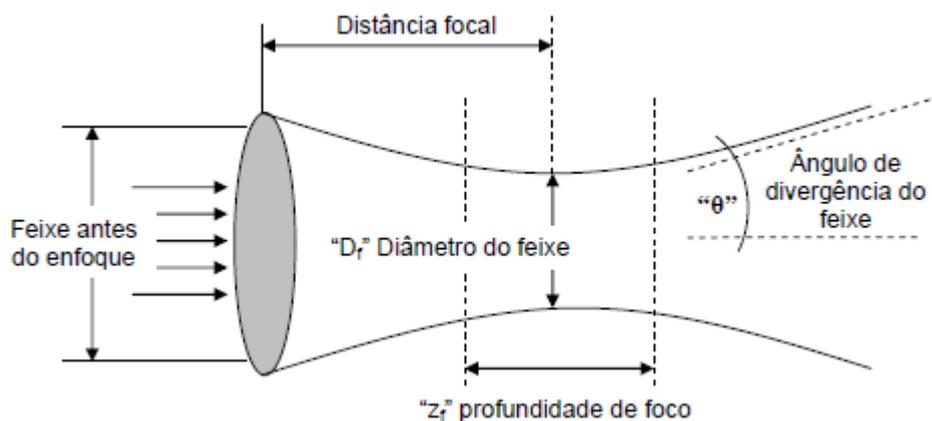


Figura 14 Características geométricas do feixe laser. Fonte: adaptado de ZHANG et al., 2011.

Com as propriedades do material conhecidas, as devidas configurações do laser e uma aplicação adequada é possível obter uma texturização com alto índice de repetitividade e reprodutibilidade da textura desejada no material.

2.11.3 Ablação por pulsos de laser ultracurtos

De acordo com Rossi (2011) as características típicas dos pulsos ultracurtos para ablação de sólidos consistem em energias na faixa de dezenas de centenas de microjaules, largura de pulso em torno de 100 fs e focalização em tamanhos de pontos de 20 μm de raio, gerando intensidades na faixa de 10^{12} - 10^{14} W / cm^2 .

Quando um pulso ultracurto incide sobre um sólido, o fato da sua duração ser menor do que o período de vibração dos íons da rede significa que a maior parte da energia do pulso será transferida para os elétrons dos materiais, aquecendo-os. A maior parte da energia térmica dos elétrons será levada com o material que sofreu ablação, e a pequena porção restante será acoplada aos íons, aquecendo a rede.

2.11.4 Mecanismos físicos da ablação

O mecanismo subjacente para a ablação por pulsos de laser ultracurtos é praticamente o mesmo para todas as classes de materiais (seja ela metais, semicondutores, dielétricos, polímeros e outros.): quando um pulso colide com a superfície do material, os elétrons da semente são acelerados pelo campo elétrico do pulso em um movimento trêmulo, gerando elétrons livres na banda de condução por colisões, em um processo de avalanche exponencial (Bloembergen et al., 1974 e Du et al., 1994), ou são ejetados da superfície devido à energia cinética adquirida (Reif *et al.*, 2006). O processo de ejeção tem grande probabilidade de ocorrência nos 100nm da camada superficial dos elétrons que adquiriram alguns eV (eletro volts) de energia cinética, deixando um desequilíbrio de carga que pode produzir uma explosão de Coulomb dos íons de rede após o pulso (Bulgakova *et al.*, 2005).

Ao mesmo tempo à ejeção de elétrons da superfície, o processo de avalanche ocorre em camadas mais profundas do material, aumentando a densidade e a temperatura dos elétrons livre, enquanto a rede é mantida a uma temperatura mais baixa (Kanavin *et al.*, 1998 e Singh *et al.*, 2004). Caso a energia e a intensidade do pulso forem suficientemente altas, a densidade de elétrons livres atinge um valor crítico (Cerca de 10^{21} cm^{-3}) e então os elétrons transferem sua energia para os íons circunvizinhos (Du *et al.*, 1994 e Stuart *et al.*, 1996). Esse relaxamento aquece rapidamente a rede vizinha à valores acima da sua temperatura de vaporização, criando uma fase instável que sofre uma violenta expansão adiabática (fase de explosão) (Lorazo *et al.*, 2003), removendo material da superfície, e transportando a maior parte da energia térmica com ele. Além da espaço e fragmentação, podem ocorrer, mesmo não sendo os efeitos comuns (Zhigilei *et al.*, 2003).

2.12 EFEITO DA TEXTURA NA USINAGEM

A influência da textura em ferramentas de corte vem sendo investigada para diversas aplicações na usinagem, seja ela para a redução da temperatura da interface cavaco-ferramenta, rugosidade final da peça, ancoragem do fluido de corte ou até mesmo para a redução das forças de corte.

Kawasegi *et al.* (2009) investigaram o efeito das orientações das texturas na ferramenta de corte, apresentando resultados interessantes. Eles avaliaram o efeito das texturas perpendiculares, paralelas e cruzadas para nano e microtexturas. Foi encontrado uma redução nas forças de corte quando se utilizou a orientação perpendicular, já as orientações paralelas e cruzadas apresentaram resultados similares quando comparados a ferramentas sem texturização.

Koshy *et al.* (2011), investigaram os efeitos da distância entre a aresta de corte e o início da microtextura de orientação paralela na ferramenta de corte, essa pesquisa foi interessante, pois os autores descobriram que o ângulo de fricção é mínimo quando a relação entre a distância e o avanço é de aproximadamente 2 a 3 vezes.

Os mesmos autores investigaram a força de usinagem relacionando com a porcentagem de área texturizada na superfície da ferramenta e encontraram que com o aumento da área texturizada ocorre uma redução da força proporcional ao aumento, apresentado na Figura 15.

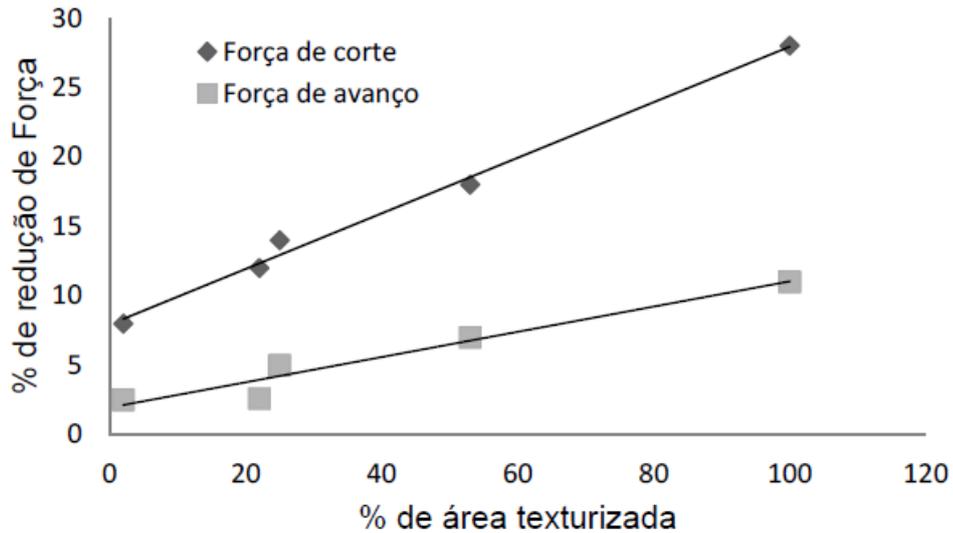


Figura 15. Influência da área texturizada nas forças de usinagem (Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011).

Estes autores comentam que a textura deve apenas ser realizada na região da zona de deslizamento do cavaco, como mostra a Figura 16.

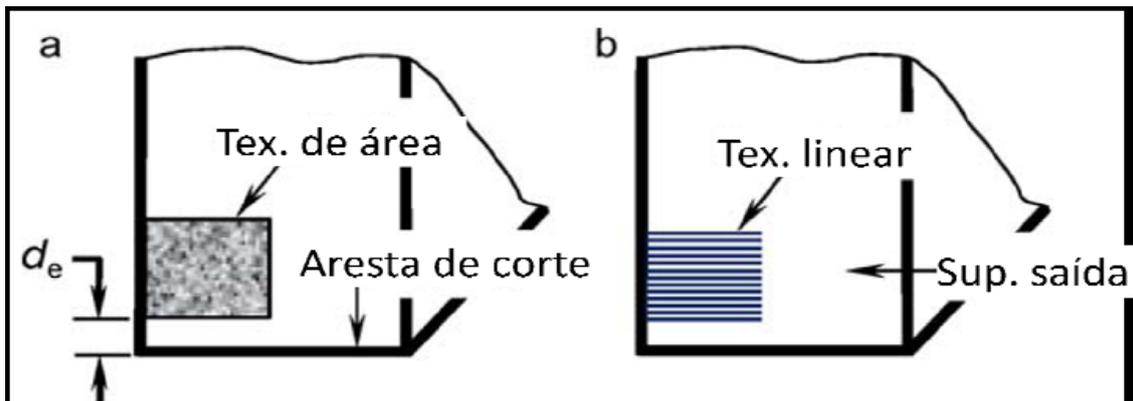


Figura 16. Posicionamento da textura. Fonte: Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011.

A região indicada na Figura 16 como d_e corresponde a zona de aderência, onde não se encontra presente o movimento relativo entre o cavaco e a superfície da ferramenta de corte, onde, a princípio, a texturização não é necessária. Com isso a textura começa a partir do ponto onde há movimento relativo na superfície (zona de escorregamento).

Bertolete *et al.* (2017), investigaram o efeito de diferentes modelos de textura (variando a distância da aresta de corte e do passo da cavidade texturizada) na face de ancoragem de ferramentas de metal duro, comparando com uma ferramenta não texturizada (ferramenta de referência), durante a usinagem do aço inoxidável VSM13 martensítico. Os experimentos no aço inoxidável forneceram conclusões interessantes em

favor das ferramentas texturizadas. Acredita-se que a textura altere o comportamento tribológico na zona de deslizamento, uma vez que os resultados mostraram melhor desempenho para o modelo de textura que começa a partir de uma distância de 300 μm da aresta de corte.

Com relação à temperatura da interface cavaco-ferramenta, o trabalho de Shuting *et al.* (2009) mostrou que a aplicação de textura na ferramenta de corte é efetiva para a criação de micro cavidades, que atuam como reservatórios de lubrificantes sólidos, agindo diretamente na zona de contato cavaco-ferramenta, reduzindo a temperatura. A textura diminui a área de contato real, por consequência diminui a energia necessária para cisalhar o cavaco e por consequente a temperatura de corte.

Olleak *et al.* (2017) apresentaram um estudo interessante sobre micro texturização a laser, onde investigaram, através de simulações em modelamento 3D (método dos elementos finitos), o efeito das diferentes microtexturas em ferramentas de corte, avaliando a força de corte, temperatura, tensões e distribuição do desgaste da ferramenta, comparando os resultados matemáticos com resultados experimentais de medições de forças de cortes. Em seus estudos eles avaliaram o comportamento de cinco microtexturas com orientações, ilustradas na Figura 12:

- Canais paralelos a aresta de corte;
- Canais perpendiculares a aresta de corte;
- Superfície com textura em pontos distribuídos uniformemente;
- Superfície com textura em pontos com orientação na diagonal;
- Canais diagonais a aresta de corte;

Todas as cinco texturas apresentaram melhores distribuições de tensões, em comparação com a ferramenta não texturizada, exceto a ferramenta de corte com a microtextura de orientação paralela, que apresentou uma tensão maior em uma área maior. As ferramentas com micro texturização de orientações perpendicular e diagonal à aresta de corte apresentaram as maiores reduções na força de corte. Além disso, foi observado nas ferramentas micro texturizadas um desgaste inferior à ferramenta não texturizada, indicando melhorias potenciais no desempenho da ferramenta para aplicações de usinagem a seco.

Sugihara *et al.* (2017) estudaram o efeito da microtexturização a laser em ferramentas de corte, texturizando a superfície de folga. Durante o processo de usinagem da liga de Inconel 718, concluíram que as ferramentas de corte de CBN texturizadas, com

um laser de femtosegundos, tiveram as texturas atuando como micro canais, os quais promoveram o fornecimento do fluido de corte para a zona de contato e reduziram a área de contato da ferramenta com a peça de trabalho. Os resultados experimentais mostraram claramente que a ferramenta de corte desenvolvida suprimiu com sucesso o desgaste do flanco comparado com uma ferramenta CBN convencional sem textura superficial, sugerindo que a tecnologia de texturização superficial é um método promissor para melhorar a vida útil da ferramenta de CBN na usinagem de alta velocidade do Inconel 718.

Kawasegi *et al.* (2009), estudaram o efeito de três diferentes microtexturas na superfície de saída de ferramentas de corte de metal duro, fabricadas a partir de um laser de femtosegundos, ilustradas na Figura 17:

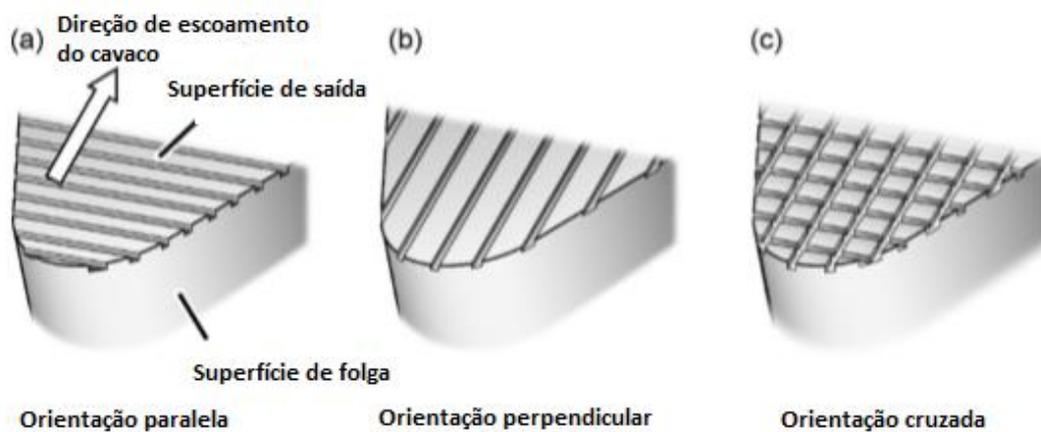


Figura 17. Diferentes microtexturas na superfície de saída. a) Orientação paralela; b) Orientação perpendicular; c) orientação cruzada. Fonte: Adaptado de Kawasegi *et al.*, 2009.

As texturas tiveram como resultado uma redução significativa no atrito da superfície, reduzindo por consequência as forças de corte durante a usinagem. Esse efeito se deve principalmente para a redução da área de contato entre a ferramenta e o material usinado. Quando usinando ligas de alumínio, percebeu-se que em altas velocidades de corte, devido a diferença de aderência do material, a área de contato cavaco-ferramenta e as forças de corte tiveram grande redução.

D. Arulkirubakaran *et al.* (2016) fabricaram ferramentas de cortes com texturas paralelas e perpendiculares à direção de escoamento do cavaco e também com orientação cruzada, por meio de um processo de usinagem por EDM. A Figura 18 ilustra essas ferramentas.

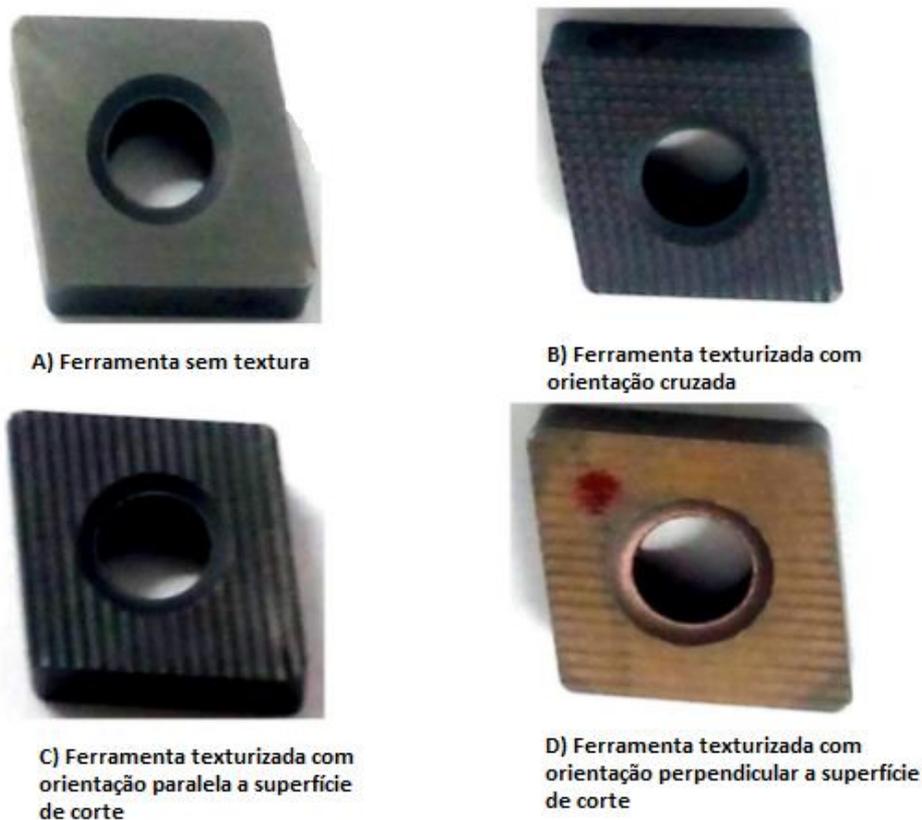


Figura 18. Diferentes texturas fabricadas por EDM. A) Ferramenta sem textura; B) Ferramenta texturizada com orientação cruzada; C) Ferramenta texturizada com orientação paralela à superfície de corte; D) Ferramenta texturizada com orientação perpendicular à superfície de corte. Fonte: Adaptado de D. Arulkirubakaran *et al.* (2016).

O torneamento da superliga Ti-6Al-4V foi realizada com diferentes condições de corte, usando bissulfeto de molibdênio com óleo SAE 40 como lubrificante. Concluíram que:

- A usinabilidade da liga Ti-6Al-4V pode ser melhorada para a ferramenta com textura perpendicular.
- Redução na área de contato ferramenta-peça, coeficiente de atrito e temperatura de corte foram claras durante o estudo, principalmente para a textura perpendicular.
- As forças de corte foram menores para a ferramenta de corte com textura perpendicular, quando comparada com as demais ferramentas testadas.
- Observou-se cavacos curvos durante a usinagem e ocorreu uma redução do diâmetro de curvatura do cavaco para a ferramenta de corte com a textura paralela, devido ao menor atrito.

Observa-se que as evidências tribológicas mostraram que, para o melhor modelo, a texturização proporcionou uma queda na força de atrito em quase 40%, uma diminuição da deformação do cavaco em cerca de 21%, conseqüentemente permitindo a hipótese de que a temperatura de corte também cai; uma redução na força de usinagem em 20%; e uma melhoria na rugosidade da superfície: 46% para Ra e 28% para Rz. Além disso, observaram que as texturas proporcionam valores de desvio padrão menores quando comparados com a ferramenta de referência (BERTOLETE *et al.*, 2017).

Ze *et al.* (2012) estudaram a influência da micro texturização de uma elipse na superfície de saída, da micro texturização da superfície de folga com orientações paralelas a aresta de corte, ambas com bissulfeto de molibdênio no interior dos micro canais para tornar a ferramenta auto lubrificante, durante a usinagem a seco de uma liga de Ti-6Al-4V. Tiveram como resultado:

- As forças de corte e a temperatura na usinagem a seco da liga Ti-6Al-4V, utilizando uma ferramenta micro texturizada com auto lubrificante, tiveram melhores resultados do que as não texturizadas. Os melhores resultados de força e temperatura obtidos foram para a ferramenta texturizada na superfície de saída.
- A aplicação da microtextura em elipse na superfície de saída da ferramenta de corte de metal duro faz com que o coeficiente de atrito reduza, formando uma camada de auto lubrificante na área de contato do cavaco com a ferramenta, além de reduzir a espessura média do cavaco.
- A vida da ferramenta de corte aumentou em 10-15% para a micro texturizada na superfície de saída, e de 10-30% para a ferramenta de corte texturizada na superfície de folga, comparando com a ferramenta não texturizada com velocidades de corte inferiores a 120m/min.
- As reduções das forças de corte e da temperatura são mais notáveis quando em usinagem a baixas velocidades de corte.

O efeito da orientação do sulco foi estudado por Xie *et al.* (2013), considerando texturas diagonais de 45 ° e perpendiculares na usinagem da liga de titânio Ti-6Al-4V. A taxa de desgaste da ferramenta com ranhura diagonal foi menor do que a ferramenta com ranhura paralela.

Kim *et al.* (2013) estudaram o efeito da texturização com orientação perpendicular na ferramenta de corte na usinagem do aço AISI 52100, com diferentes valores da taxa

de avanço, onde uma redução maior nas forças de corte, no desgaste da ferramenta e no coeficiente de fricção foi obtida em baixos valores de avanço.

Gajrani *et al.* (2018) testaram três diferentes ferramentas de corte de metal duro com a utilização de um medidor de dureza Vickers e também um medidor de dureza por risco. Foram depositados no interior dos micros canais bissulfeto de molibdênio. Os ensaios foram realizados com texturas com e sem bissulfeto, com orientação perpendicular, paralela à aresta de corte e também com pequenas crateras na superfície. Utilizou uma câmera térmica para avaliar a temperatura e obteve uma redução significativa nas ferramentas texturizadas, quando comparadas a não texturizada. Obteve também uma redução significativa da força de usinagem de 4,23-10,82% para a ferramenta de corte com texturas perpendiculares a aresta de corte sem revestimento, e 7,31-17,41% para as ferramentas com o revestimento e textura perpendicular.

Observa-se assim, que vários trabalhos de investigação científica do efeito de texturas e ferramentas de corte estão disponíveis na literatura, a maioria com resultados positivos. Entretanto, ainda não há uma diretriz, principalmente com relação as configurações e dimensões das texturas, para indicar as melhores condições. As orientações texturas com relação à aresta de corte da ferramenta e à saída do cavaco também não está bem resolvida. Isto implica que muitas pesquisas ainda são necessárias para avançar na aplicabilidade desta tecnologia.

3. METODOLOGIA

3.1 ASPECTOS GERAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais, equipamentos e planejamentos utilizados nas etapas dos estudos experimentais de ferramentas de corte microtexturizadas a laser pulsado, no torneamento de aço ABNT 1020.

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para estudar a influência da texturização a laser em ferramentas de metal duro de classe P30 na usinagem de aço baixo carbono ABNT 1020, a metodologia foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa se determinou os parâmetros do laser para produzir as texturas planejadas, com as dimensões de largura, profundidade e diâmetro desejadas. Uma vez definido as condições de operação do laser, foram produzidas as texturas nas ferramentas de corte. Na segunda etapa se desenvolveu os testes de usinagem por torneamento com as ferramentas com diferentes geometrias de microtexturas, considerando medições de forças de usinagem, temperatura e rugosidade final da peça.

3.2.1 Preparação das amostras do aço ABNT 1020

Com o objetivo de levantar as características do material utilizado nos ensaios de força e temperatura de usinagem, um aço comum ao carbono ABNT 1020, foi realizado ensaios metalográfico e de dureza. Para isso, foi utilizado uma bolacha de 5 mm da barra, que possui aproximadamente 100 mm de diâmetro. Desta bolacha foram cortadas cinco amostras quadradas de 5x5 mm com orientação radial da extremidade até o centro da barra. Essa orientação foi utilizada para verificar se as propriedades e características mecânicas do material se mantinham constantes ao longo da seção transversal. As amostras foram embutidas, lixadas, polidas, atacadas e analisadas metalograficamente e depois a dureza (Rockwell) foi medida. O ataque químico foi feito com Nital 2%, e para

o ensaio de dureza foram coletados 4 pontos de cada amostra, respeitando a distância mínima entre cada ensaio, seguido do cálculo da média entre os valores obtidos para cada ponto.

Para os testes de usinagem foi utilizado uma barra de aço baixo carbono ABNT 1020 laminada, com 68 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, com dureza média de 65HB, com composição química (0,18 a 0,23%C; 0,3 a 0,6%Mn; 0,05%S (max); 0,04%P (max) e Fe (restante). A microestrutura do material é apresentada na Figura 19.

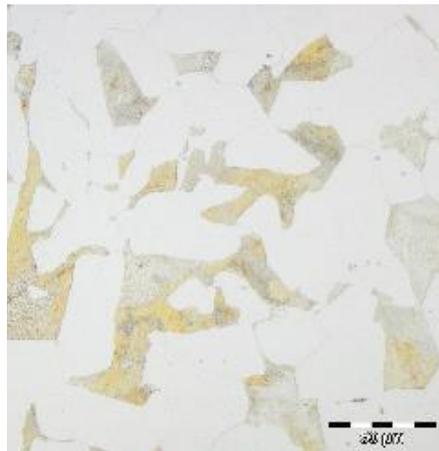


Figura 19. Microestrutura do aço ABNT 1020, ataque com Nital 3%; ampl. 50X. Fonte: O autor, 2019.

3.2.2 Preparação dos Bits de metal duro de classe P30

As ferramentas de corte utilizadas nessa dissertação são hastes (bits) de metal duro, de classe P30, sem revestimento, fabricadas pela FERMEC. Ao todo foram utilizados 14 bits com dimensões 10x10x100mm. Cada bit teve a afiação geométrica da cunha realizada de acordo com a tabela 4, nas duas extremidades, totalizando 28 cunhas cortantes.

Tabela 1. Geometria da ferramenta de corte

Geometria da Ferramenta de Corte	
Ângulo de Folga (α_0)	5°
Ângulo de Cunha (β_0)	80°
Ângulo de Saída (γ_0)	5°
Ângulo de Inclinação (λ_s)	0°
Ângulo de Posição Principal (χ_r)	75°
Ângulo de Ponta (ϵ_r)	90°
Ângulo de Posição Secundária ($\chi'r$)	15°

A Figura 20 identifica cada um dos ângulos da ferramenta de corte.

- Ângulo de Cunha (β)
- Ângulo de Posição (χ)
- Ângulo de Saída (γ)
- Ângulo de Inclinação (λ)
- Ângulo de folga (α)

- Pr → Plano de referência
- Pp → Plano dorsal
- Ps → Plano de corte
- Pf → Plano de trabalho
- Po → Plano ortogonal
- Pn → Plano normal a aresta de corte

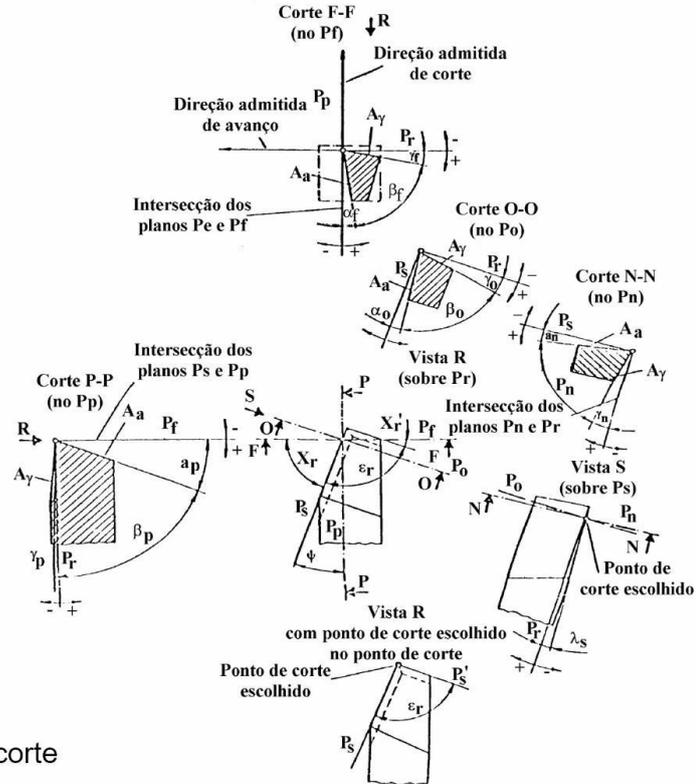


Figura 20. Ângulos da ferramenta de corte para torneamento. Fonte: Stemmer, (1993) (adaptado).

As ferramentas foram afiadas por WEDM (Eletroerosão a fio), através da máquina Charmilles ROBOFIL 290. A usinagem por eletroerosão foi realizada com um fio de latão de espessura de 0,25mm. Após o corte, a cunha foi retificada numa afiadora universal da marca Erwin Junker, modelo BN102C, usando um rebolo de CBN. Na sequência as ferramentas foram enviadas a uma empresa parceira, na região metropolitana de Curitiba, para arredondamento da aresta em um raio de aproximadamente 0,30 microns, por utilizando uma máquina Drag Finishing, modelo serie DF Basic fabricado pela OTEC, o abrasivo utilizado foi o TZMS 4/5 do mesmo fabricante da máquina.

Com as cunhas prontas, as ferramentas foram enviadas para o Laboratório de laser do IPEN, as quais passaram pelo processo de microtexturização a laser, onde seu princípio de funcionamento foi explicado no item 2.11 As texturas obtidas foram linhas de orientação paralelas, perpendiculares e a 45° em relação a aresta de corte, e também foram fabricadas as texturas em “V” (chevrons), conforme ilustrado na Figura 21.

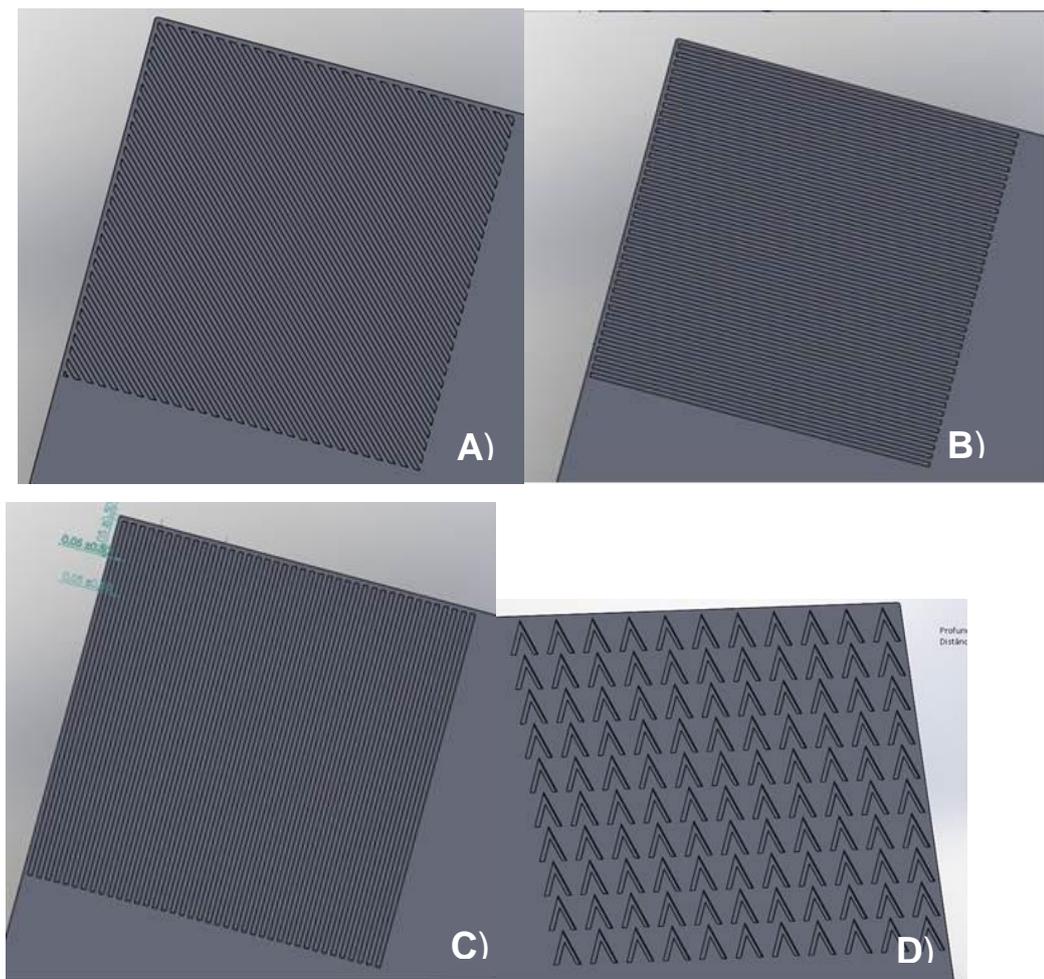


Figura 21. Detalhes das texturas estudadas nesta pesquisa, todas com profundidade de 0,03mm, canais com largura de 0,05mm, espaçamento entre eles de 0,05mm, distância das extremidades de 0,05mm e a área total microtexturizada foi de 4mmx4mm. A) 45°. B) Perpendicular. C) Paralelas. D) “V” (Chevrons). Fonte: O Autor, 2019.

3.2.3 Preparação das microtexturas através do laser de Femtosegundos

Através de um equipamento de laser femtosegundos de Ti:safira, do IPEN (instituto de pesquisa energética nuclear) localizado na USP (Universidade de São Paulo) utilizou-se um feixe laser com perfil Gaussiano focalizado, que produz um ponto focal com um determinado diâmetro, na escala micrométrica. O valor depende do comprimento focal da lente de focalização, do diâmetro do feixe incidente nesta lente, do comprimento de onda e da qualidade do feixe gaussiano, conforme equação 3.1.

$$\varnothing_{focus} = \frac{4M^2 f}{\lambda \varnothing_0} \quad [3.1]$$

onde,

\varnothing_{focus} é o diâmetro do ponto focal

M^2 é o fator de qualidade do feixe laser

λ é o comprimento de onda

f é o comprimento focal da lente de focalização

\varnothing_0 é o diâmetro do feixe laser incidente na lente de focalização

Neste trabalho, utilizou-se um diâmetro do ponto focal do feixe de 3,6 μm . Isto significa que para produzir um canal com largura maior que o diâmetro do ponto focal, é necessário produzir linhas paralelas, com a largura do diâmetro focal, até cobrir a largura desejada. Esta camada de linhas paralelas irá produzir uma profundidade de material ejetado por ablação, que depende de vários fatores. Conhecendo-se esta profundidade, cria-se sobreposições de camadas até atingir a profundidade desejada. Assim, usando-se um programa de usinagem específico (Cadcaml), é possível usinar canais com formas e dimensões bem controladas. Para isto é preciso fornecer os parâmetros corretos de usinagem, que neste caso são o diâmetro focal, a velocidade de processo (de varredura do feixe de laser), a distância entre os centros das linhas paralelas e a profundidade de corte, ou seja, a profundidade ablacionada em cada camada.

No caso real, o primeiro problema surgiu quando se verificou que o diâmetro da cratera usinada pode variar muito. Ou seja, o diâmetro da cratera ablacionada por um pulso do laser não é igual ao diâmetro do ponto focal do laser. Ele pode ser maior ou menor, dependendo da densidade de energia utilizada (fluência F) e da sensibilidade do material à interação com um pulso laser ultrarápido. Assim, é preciso fazer alguns experimentos para determinar este diâmetro. Neste trabalho utilizou-se a maior energia disponível e a maior taxa de repetição do sistema laser, ou seja, energia $E = 30 \mu\text{J}$ e taxa de repetição $F = 10 \text{ kHz}$.

Em seguida, é preciso escolher a velocidade de processo, ou a velocidade de varredura do feixe laser. Esta velocidade, combinada com a taxa de repetição de pulsos determina a quantidade de vezes que os pulsos se sobrepõe em uma mesma região. Assim, uma velocidade de 50 mm/s com a taxa de repetição de 10 kHz significa que o deslocamento do feixe laser entre um pulso e o próximo é de 5 μm . Se, por exemplo, o diâmetro da cratera ablacionada por um pulso é de 10 μm , então, nestas condições, a

região do foco sofre uma sobreposição N igual a dois pulsos. Da mesma maneira, velocidades menores implicam em sobreposições N maiores, e velocidades maiores em sobreposições menores, que devem ser ajustadas até que os pulsos não se sobreponham mais.

O problema fica mais complexo à medida que se verifica que o diâmetro e profundidade da região ablacionada não é proporcional a N . Isto acontece porque quando um pulso atinge uma superfície já danificada por um pulso anterior, ele encontra uma condição de absorção diferente e é mais facilmente absorvido. O pulso do laser modifica a estrutura eletrônica da superfície afetada, criando mais canais de absorção para o pulso subsequente. Isto aumenta a eficiência de extração de material, mas também pode causar danos não desejados, como microtrincas, fusão e rebarbas. Portanto, uma vez escolhida a energia e a taxa de repetição, é preciso fazer experimentos para determinar uma condição de velocidade de processo que não cause danos excessivos ao material remanescente e que ainda seja eficiente para o processo de usinagem em questão.

Estes experimentos foram realizados para produção de canais com largura de 50 μm buscando-se a maior profundidade por camada ablacionada. A Figura 22 mostra alguns dos canais produzidos na melhor condição de usinagem, cujos parâmetros obtidos foram:

Energia $E = 4,0 \mu\text{J}$,

Taxa de repetição $F = 10 \text{ kHz}$,

Velocidade de processo: $V = 1,5 \text{ mm/s}$

Sobreposição lateral de trilhas = 3,5 μm

Profundidade de cada camada ablacionada: 10 μm

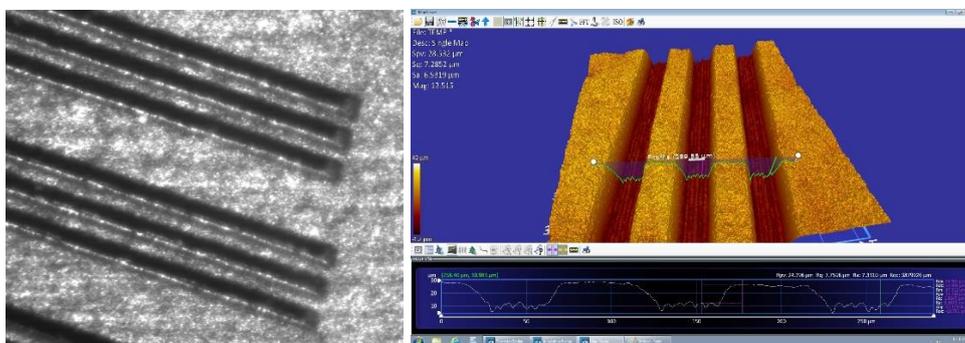


Figura 22. Canais obtidos durante os ensaios para obtenção das melhores condições de usinagem. A figura à direita mostra uma imagem de perfilometria dos canais.

Com estes parâmetros de processo o software Mastercam foi utilizado para gerar um programa “.nc” para o controle numérico do estágio de deslocamento. Assim, a ferramenta foi posicionada em um goniômetro de dois eixos colocado sobre a mesa de deslocamento. Isto foi necessário devido aos ângulos existentes na cunha da ferramenta, para que a superfície de saída ficasse perpendicular ao feixe de laser.

A Figura 23 mostra a ferramenta sobre o goniômetro fixado sobre a mesa de deslocamento do equipamento.

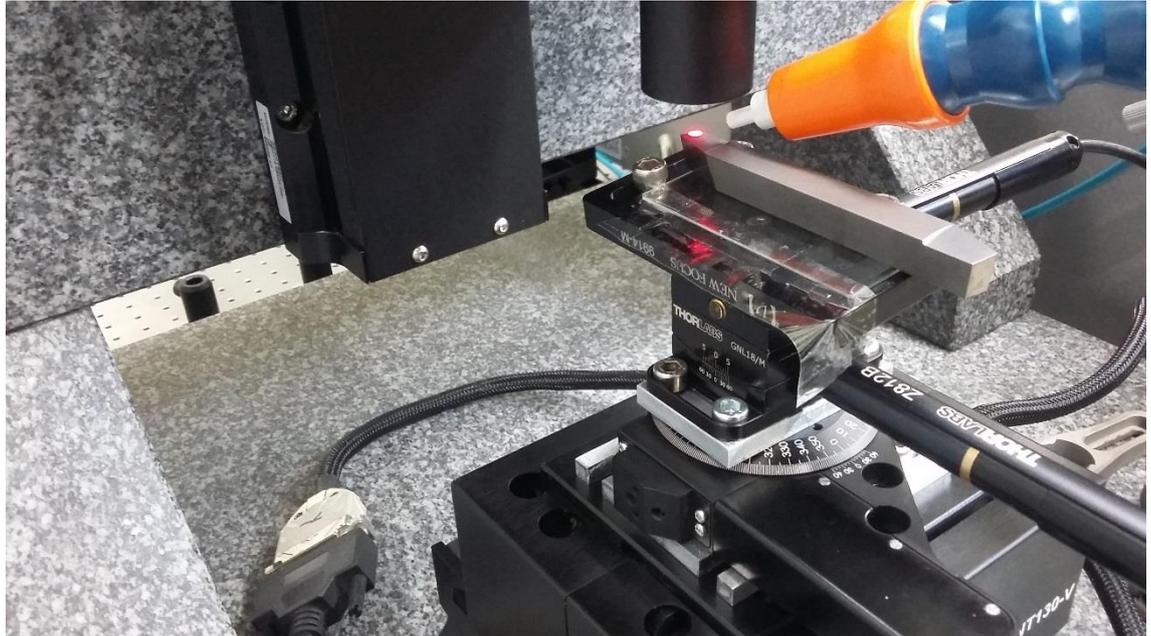


Figura 23. A ferramenta sobre o goniômetro e sobre a mesa de deslocamento. Fonte: O autor, 2019.

O mesmo procedimento foi feito para cada um dos desenhos das texturas estudadas.

Após texturizados, os bits foram analisados no MEV (Microscópio Eletrônico por Varredura) para realizar a caracterização superficial antes e depois dos ensaios. As imagens do MEV foram realizadas com diferentes ampliações (50x e 200x) e vão ser apresentadas e discutidas mais à frente, no capítulo 4.3.

3.2.4 Calibração do termopar ferramenta-peça

Segundo Recktenwald (2010), quando dois materiais diferentes entram em contato e seus pólos se encontram em diferentes temperaturas, ocorre uma indução de uma corrente elétrica, gerado pela instabilidade atômica proporcionada pelo calor

aplicado em um dos pólos, fenômeno conhecido por efeito Seebeck, ilustrado na Figura 24.



Figura 24. Esquema ilustrativo do Efeito Seebeck que rege os termopares

(FAVARETO, 2017).

Quando a junção dos materiais A e B é aquecida, ocorre a transferência de elétrons de um dos materiais para o outro, onde a corrente é intermediada por material C, que transmite o sinal até um voltímetro que realiza as medições.

Essa tensão obtida é calibrada para que o sinal seja convertido em temperatura no local de aquecimento.

Nesta dissertação, o material a ser utilizado no processo de usinagem é o aço ABNT 1020, formando um par com a ferramenta de corte de metal duro de classe P30 (o mesmo material de ferramenta utilizado nos ensaios deste estudo), cujo polo (ou junta) aquecida se dá na interface cavaco-ferramenta.

O Processo de calibração se iniciou unindo-se um cavaco de aço ABNT 1020 na forma de fita longa à ponta de uma haste de metal duro de classe P30 com solda prata, como apresentado na Figura 25. Os dois elementos do par, o cavaco de aço e a haste de metal duro, por meio de um fio intermediador de cobre, foram conectados à placa *Agilent* nas suas extremidades livres. A ponta soldada foi inserida em um forno tipo mufla.



Figura 25. Termopar de aço ABNT 1020 e ferramenta de metal duro de classe P30. Fonte: O Autor (2019).

No interior do forno, a ponta soldada, junto com um termopar tipo K (cromel/alumel) calibrado, foram aquecidos até atingir o equilíbrio térmico em várias temperaturas, até um valor máximo de 740°C. A temperatura de calibração foi limitada a este valor, uma vez que o forno não tem controle atmosférico e, portanto, promove oxidação forte no metal duro acima desta temperatura, que interferiria na calibração. Um esquema dos dois termopares no interior do forno é apresentado na Figura 26 e as curvas de valores da milivoltagem gerada pelo termopar cavaco-ferramenta e da temperatura gerada pelo termopar tipo K ilustradas na Figura 27. Os dados de temperatura em °C e de tensão em *mV* estão em função do tempo em segundos.

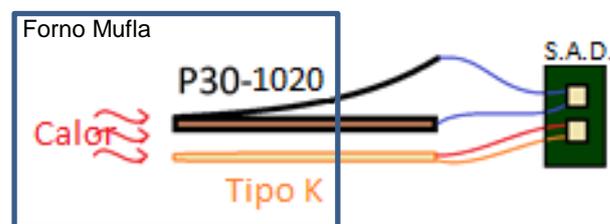


Figura 26. Ilustração do esquema de calibração do termopar ferramenta-peça. Fonte: Favaretto (2018).

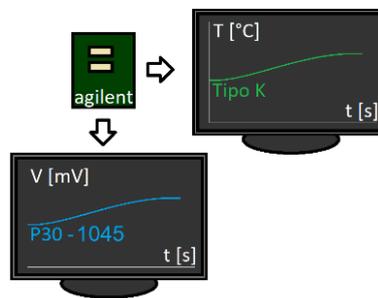


Figura 27. Curvas geradas pelos termopares na calibração. Fonte: Favaretto (2018).

A taxa de aquisição de dados pela placa ocorreu na frequência de 1 Hz, cujos pontos são apresentados na Tabela 2 e equação representativa, obtida por regressão linear (com índice de correlação de 99%), na Figura 28.

No procedimento de calibração, alguns cuidados foram tomados:

- O cavaco não podia entrar em contato diretamente com o corpo do bit (além do contato na ponta), a fim de evitar curto circuito.
- Devido a inércia térmica, foi necessário esperar a estabilização das temperaturas, para assim fazer a leitura das grandezas geradas pelos dois termopares.

- Para considerar a histerese, os sinais de temperatura foram adquiridos no aquecimento e no resfriamento (o resfriamento ocorreu com a tampa do forno aberta).
- A temperatura do forno não excedeu 740°C, para evitar oxidação.

Alguns pontos de temperatura e tensão são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 2. Dados da curva de calibração do termopar Metal duro P30/Aço ABNT 1020.

Tensão	Termopar K
Bits (mV)	Temperatura (°C)
0,575681	59,634
0,571019	60,5
0,624432	92,988
0,631358	95,839
0,640416	99,176
0,729791	134,232
1,381529	198,781
2,558468	276,496
4,120746	359,018
4,7906	387,64
6,271496	453,73
8,582351	550,548
8,599134	551,576
10,99044	649,975
13,52906	759,474

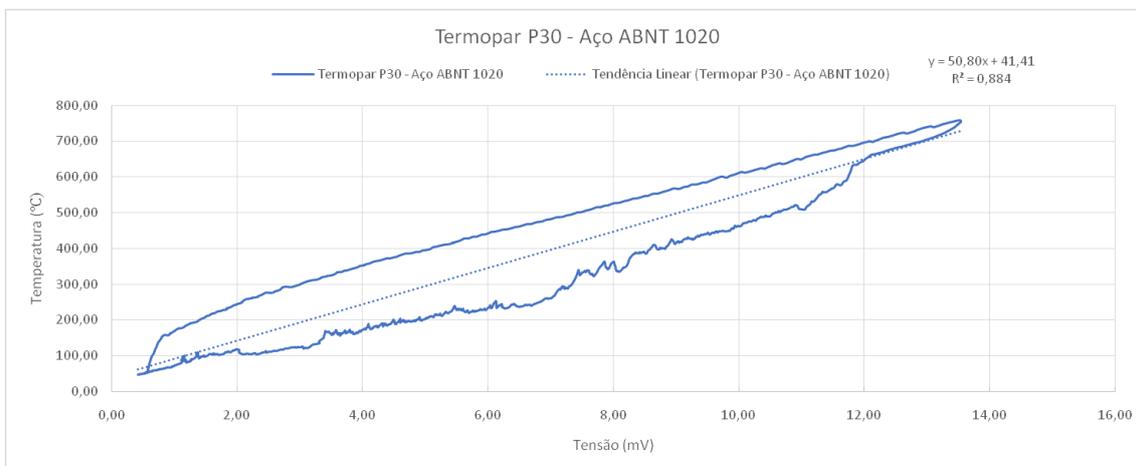


Figura 28. Gráfico da curva de calibração do termopar Metal duro P30 / Aço ABNT 1020.

Após uma regressão linear, foi gerada a equação 3.3 da reta representativa da temperatura em relação a tensão medida pelo termopar ferramenta de metal duro P30 e o aço ABNT 1020.

$$T(^{\circ}C) = 50,80 * V (mV) + 41,41 \quad [3.3]$$

Com o sistema devidamente calibrado, as tensões médias medidas durante cada teste eram usadas para obter a temperatura máxima da interface cavaco-ferramenta naquela condição, conforme será descrito na sequência.

3.2.5 Medição da temperatura da usinagem

Favaretto (2017) desenvolveu o sistema de medição de temperatura baseado no método do termopar ferramenta-peça (Figura 29), utilizando uma ponta rotativa (ou contra-ponta) modificada, para direcionar o sinal elétrico de tensão gerada na interface através da peça que está em movimento rotativo, para o sistema de aquisição de dados.

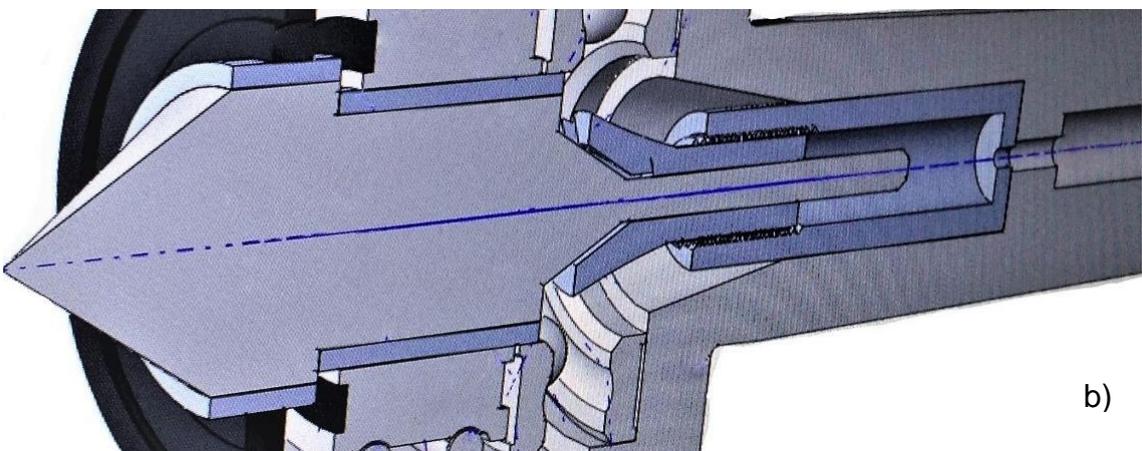
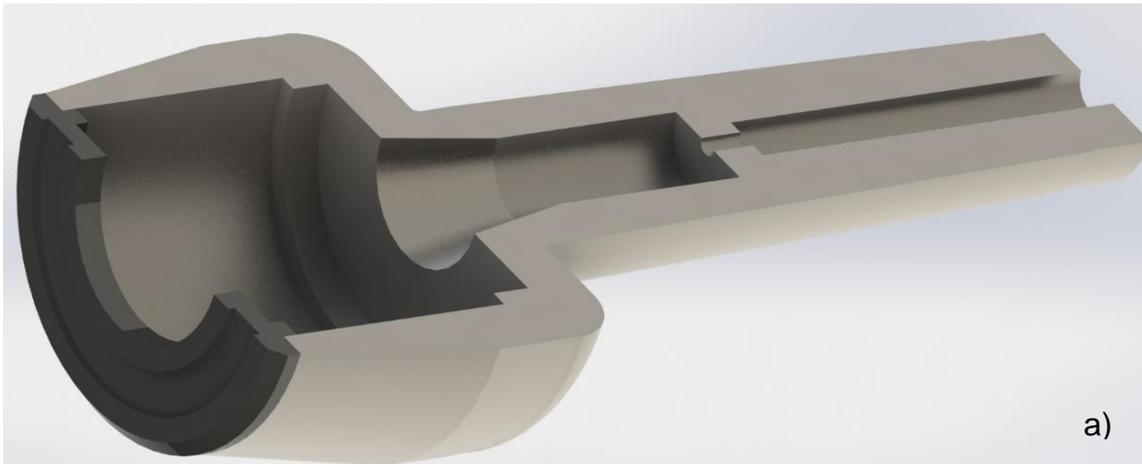


Figura 29 a) - Corte central do corpo da contra ponta; b) - Ponta rotativa isolada mostrando os elementos internos; c) - Representação do compartimento de mercúrio metálico de delrin em SolidWorks®. Fonte: Favaretto (2017, 2018).

O sistema é composto por peças eletro-isolantes de Delrin (duas buchas externas à ponta), uma ponta rotativa de aço ABNT 1020 cementado, dois rolamentos e um compartimento de metal líquido (Hg).

Para que ocorra a transferência de corrente de um corpo girante a um corpo estático deve-se existir um meio intermediador, que no caso foi utilizado mercúrio líquido

(Hg), excelente condutor elétrico e de baixo coeficiente de atrito. O compartimento apresentado na armazena o metal líquido, onde há um espaço vazado, por onde foi introduzido um fio de cobre para a saída da corrente elétrica. A contra-ponta montada é apresentada na Figura 30.



Figura 30. Contra ponta modificada, montada. Fonte: Favaretto (2017).

Para obter o sinal da ferramenta não há complicações, uma vez que no processo de torneamento ela está estacionada. Portanto, o sinal foi captado soldando um fio de cobre na extremidade do porta ferramenta metálico, que foi montado no castelo do torno de maneira isolada (revestido por uma fita isolante). Foi utilizado um sistema de aquisição de dados (SAD), para receber e gerenciar os dados do processo, mesmo sistema usado também para calibrar o termopar.

Este SAD é formado por uma placa de aquisição *Agilent* de vinte canais, que recebe os sinais elétricos (no caso diferença de potencial em *mV*) captados durante o período de corte, amplifica-os e condiciona-os, de maneira a apresentá-los em um gráfico de tensão (*mV*) por unidade de tempo (*s*), gerando um arquivo .txt com os resultados, para posterior manipulação no excel.

A montagem do sistema é mostrada esquematicamente na Figura 31, onde a peça é isolada eletronicamente das castanhas do torno mecânico em uma extremidade, por meio de uma fita adesiva, e na outra extremidade encostada na ponta rotativa (contra ponta) por um furo cônico de 30° de abertura em referência a linha de centro. A contra ponta é fixa no mandril e a ferramenta de corte é ajustada corretamente no castelo de modo a não haver contato elétrico entre eles (isolada com fita isolante). Desta forma, o sistema está pronto para executar os testes de torneamento para a medição da temperatura máxima da interface cavaco-ferramenta, com todas as ferramentas testadas, variando-se

individualmente (planejamento monovariado), primeiro o avanço (fixando-se a velocidade de corte e a profundidade de corte) e depois a velocidade de corte (fixando-se o avanço e a profundidade de corte).

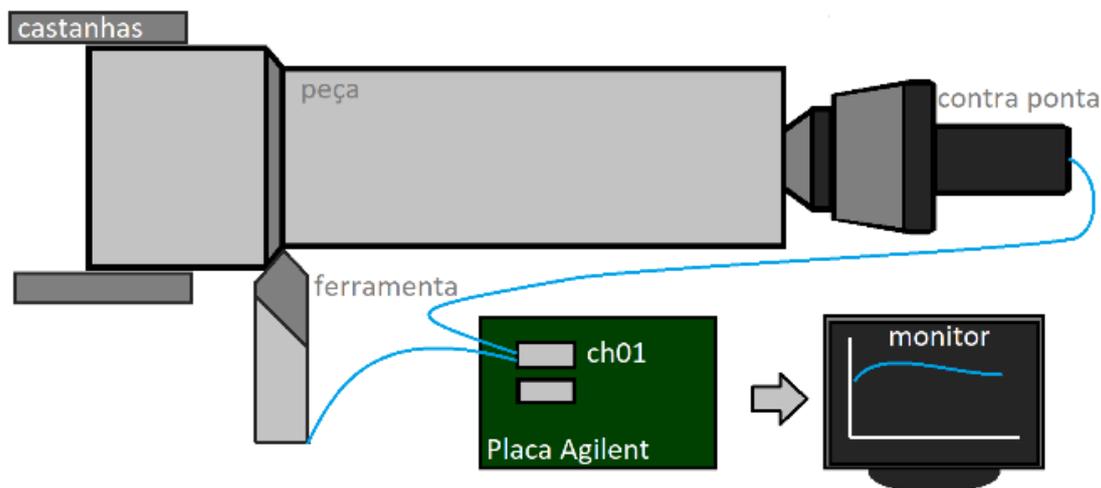


Figura 31. Representação esquemática do sistema de medição de temperatura montado. Fonte: Favaretto, 2018.

Para a medição da temperatura durante o processo de usinagem, a placa de aquisição de dados foi configurada para adquirir dados na frequência de 30Hz, durante o intervalo de tempo de 5 segundos de usinagem para todos os ensaios de temperatura.

Os testes de temperatura foram realizados em um torno convencional Tormax 30A, fabricado pela Indústrias Romi S.A, com potência de 6 cv. Para estes testes, a barra de aço ABNT 1020 tinha o diâmetro inicial de 68 mm e um comprimento de aproximadamente 200 mm. Inicialmente definiu-se os parâmetros fixos como sendo a profundidade de corte de 1,0 mm e a velocidade de corte em 96 m/min (rotação de 450 RPM e diâmetro da peça de 68 mm), variando-se o avanço em: 0,062; 0,151 e 0,327 mm/rot. Com esta metodologia, todas as ferramentas (texturizadas e sem textura), na condição a seco e com MQL puderam ser testadas no mesmo diâmetro, mantendo-se as condições idênticas, uma vez que a máquina não possui variação contínua de rotação (velocidade), mas apenas variação discreta.

Na sequência para avaliar a influência da velocidade de corte nas temperaturas de usinagem, a profundidade de corte foi fixada em 1,0 mm e o avanço em 0,151 mm/rot, variando-se a velocidade de corte em 12, 45, 76, 120, 192, 239 m /min (neste caso o diâmetro da barra de aço ABNT 1020 tinha 66 mm). Todas as ferramentas (texturizadas

e sem textura) foram testadas no mesmo diâmetro da barra, para manter as condições idênticas para todos os testes.

Os dois ensaios foram reproduzidos para todos os tipos de texturas dos bits (paralelos, perpendiculares, dots e em perfil “V” - *chevrons*) e também nos bits sem textura, a seco e com a aplicação de MQL com um óleo da Accu-lube LB1000, fabricado pela ITW Chemical Products, de base vegetal e biodegradável. A vazão do fluido foi fixada em 200 ml/h com pressão de ar de 5 bar (a pressão da linha de ar comprimido dos laboratórios da PUCPR). Para cada tipo de ensaio (variando o avanço e variando a velocidade) se trocava a aresta de corte, os ensaios foram replicados uma vez para melhorar a precisão dos resultados, utilizando a média.

3.2.6 Medição da força de usinagem

Para os ensaios de força de usinagem utilizou-se um dinamômetro Kistler, modelo 9265B e um amplificador de sinais, modelo 5070A, também fabricado pela Kistler, cabos de conexão, placa de aquisição de sinais e um microcomputador. O dinamômetro é fixado em uma placa adaptada para posicionamento no sistema porta-ferramenta do torno CNC Cincinnati Milacron, modelo HAWK 150, com potência de 7,5 kW e variação contínua de velocidade (10 a 5000 rpm) o qual foi empregado para a realização dos ensaios de medição de força. Os sinais de força de usinagem (força de corte, de avanço e passiva) eram captados pelo dinamômetro e transmitidos para o amplificador, em seguida os dados passaram por uma placa de conversão análogo-digital Kistler, e a leitura final dos dados foi feita pelo software DynoWare, do mesmo fabricante, em um computador, com taxa de aquisição configurada para 500Hz.

Em todos os ensaios fixou-se o percurso de avanço em 10 mm e os dados coletados durante todo o tempo de usinagem. A média dos pontos e os desvios padrões foram calculados para todas as componentes de força em cada ensaio. Essas componentes eram usadas para se calcular a força de usinagem, usando a equação 3.4.

$$Fu = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [3.4]$$

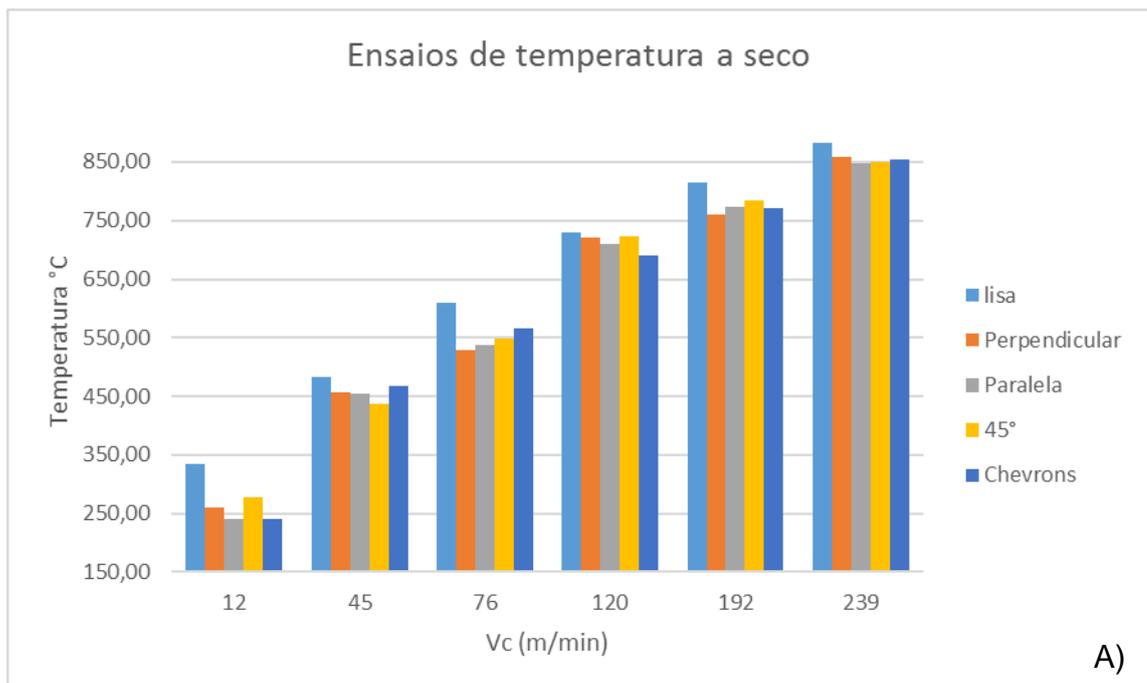
As condições de corte utilizadas nos ensaios de força foram um pouco diferentes daqueles usados nos ensaios de temperatura, uma vez que a máquina ferramenta usada para os ensaios de força é um torno CNC, com variação contínua de velocidade, permitindo maior flexibilidade de escolha dos parâmetros. Primeiramente fixou-se a velocidade de corte em 120 m/min e a profundidade de corte em 1,0 mm, variando-se o avanço: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 mm/rot. Depois fixou-se o avanço em 0,15 mm/rot e a profundidade de corte em 1,0 mm e variou-se a velocidade de corte: 30, 60, 120, 180, 240, 300 e 360 m/min. Os testes foram executados a seco e com aplicação de MQL, os mesmos equipamentos, fluido, vazão do óleo e pressão do ar comprimido utilizados nos ensaios de temperatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DE TEMPERATURA

Os ensaios de temperatura comparam a variação da temperatura máxima da interface cavaco-ferramenta (valores médios) entre as diferentes ferramentas com microtexturas e sem microtextura, a seco e com MQL, quando se variou a velocidade de corte e o avanço. Os resultados gerais são mostrados nas Tabelas A.1 a A.4 do Apêndice 1.

Primeiramente as temperaturas foram estudadas variando-se a velocidades de corte, com o avanço fixo em 0,151 mm/rot e profundidade de corte, também fixa, em 1,0 mm, com diâmetro da peça usinada de 68 mm. Os ensaios foram realizados a seco e com o uso de MQL, cujos resultados são apresentados, respectivamente, nas Figura 32 A e B (ver também Tabelas A.1 e A.2 do Apêndice 1).



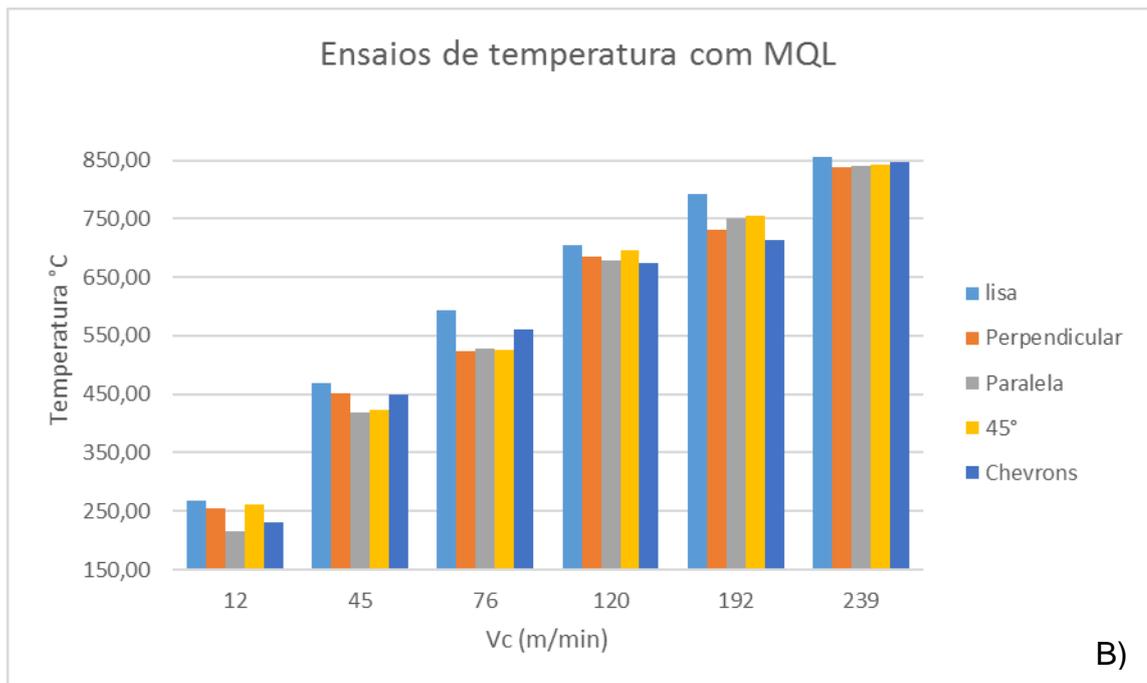


Figura 32. Teste de temperatura variando a velocidade de corte. A) a seco; B) com MQL

Na sequência, as temperaturas foram estudadas variando-se o avanço, com a velocidade de corte fixa em 96 m/min e a profundidade de corte em 1,0 mm, com o diâmetro da peça usinada de 68 mm (estes ensaios foram executados primeiro, para depois executar os testes variando-se a velocidade de corte, na mesma barra do material). Os ensaios foram realizados a seco e com o uso de MQL, cujos resultados são apresentados, respectivamente, pela Figura 33 A e B (ver também Tabelas A.3 e A.4 do Apêndice 1).

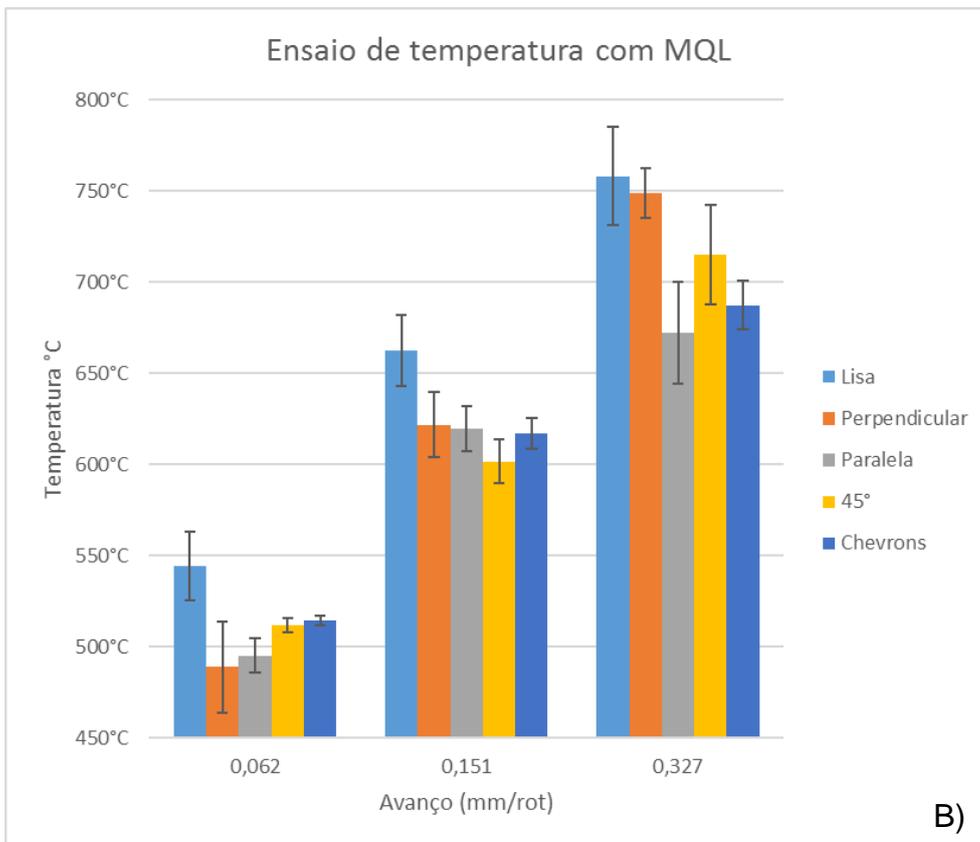
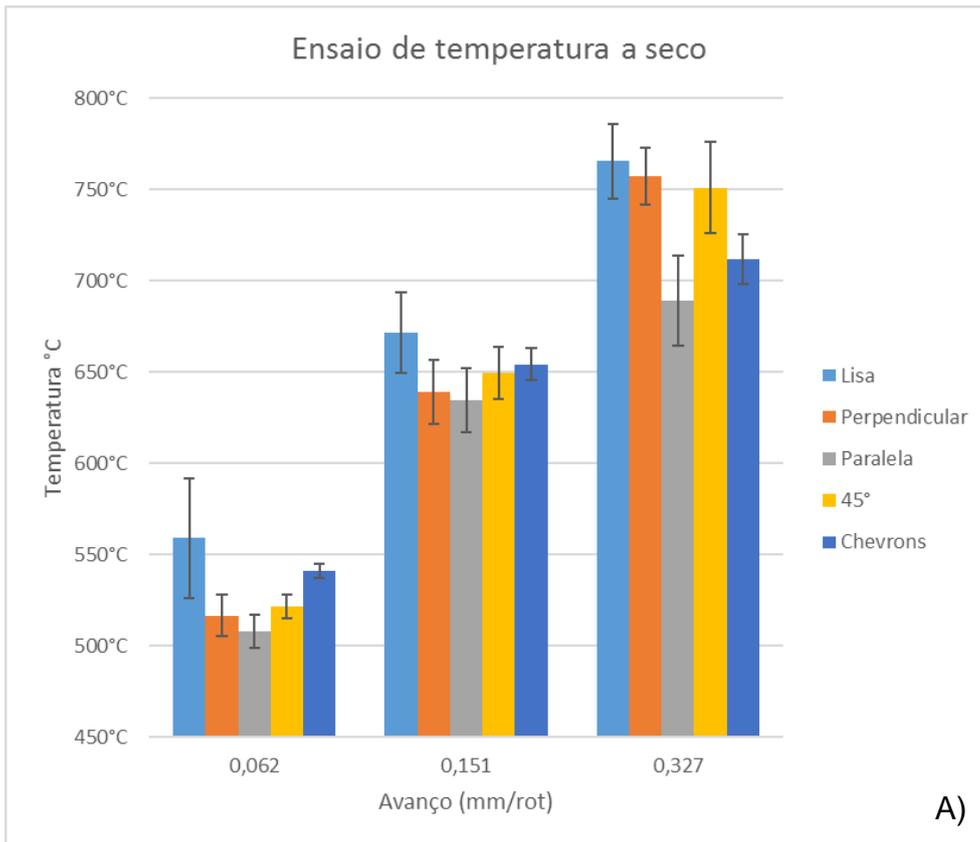


Figura 33. Teste de temperatura variando o avanço. A) a seco; B) com MQL.

Analisando os resultados dos ensaios de temperatura a seco e com MQL, tanto variando a velocidade de corte, quanto variando o avanço (ver também Tabelas A.1 a A.4 do Apêndice 1), nota-se que, no geral, as ferramentas com a superfície de saída microtexturizadas apresentaram menores valores de temperatura quando comparadas com a ferramenta lisa.

Para os ensaios variando a velocidade de corte, a seco (Figura 32 A), as variações médias das temperaturas das ferramentas microtexturizadas com relação a temperatura da ferramenta lisa foram de:

- 1°. Paralelo: -7,5%
- 2°. Perpendicular: -7,1%
- 3°. “V”: -6,8%
- 4°. 45°: -6,1%

Para os ensaios variando a velocidade de corte, com MQL (Figura 32 B), as variações médias das temperaturas das ferramentas microtexturizadas com relação a temperatura da ferramenta lisa foram de:

- 1°. Paralelo: -6,9%
- 2°. “V”: -5,6%
- 3°. Perpendicular: -5,4%
- 4°. 45°: -4,9%

Para os ensaios variando o avanço a seco (**Figura 33 A**), as variações médias das temperaturas das ferramentas microtexturizadas com relação a temperatura da ferramenta lisa foram de:

- 1°. Paralelo: -8,2%
- 2°. “V”: -4,5%
- 3°. Perpendicular: -4,2%
- 4°. 45°: -3,7%

Para os ensaios variando o avanço com MQL (**Figura 33****Erro! Fonte de referência não encontrada.** B), as variações médias das temperaturas das ferramentas microtexturizadas com relação a temperatura da ferramenta lisa foram de:

- 1°. Paralelo: -9,1%

2°. “V”: -7,4%

3°. 45°: -6,9%

4°. Perpendicular: -5,4%

A . ANOVA dos resultados de temperatura quando se variou a velocidade de corte Tabela 3 apresenta os resultados da análise de variância – ANOVA da temperatura, considerando todos os testes (ferramentas texturizadas e sem textura e testes a seco e com MQL) quando se variou a velocidade de corte, para um nível de confiança de 95% e nível de significância de 5%. Com este índice, um parâmetro é considerado estatisticamente significativo quando o valor de probabilidade é menor que 5% ($p\text{-value} < 0,05$).

Tabela 3. ANOVA dos resultados de temperatura quando se variou a velocidade de corte

Efeito	Univariate Tests of Significance for Temperature Variando a velocidade de corte				
	SS	DF	MS	F	p-value
Interação	21351733	1	21351733	87870,29	0,000000
Textura	15725	4	3931	16,18	0,000000
Lubrificação	6719	1	6719	27,65	0,000003
Vc (m/min)	2420742	5	484148	1992,45	0,000000
Error	11907	49	243		

Observa-se que todos os parâmetros considerados na análise, isto é, textura da ferramenta, sistema lubri-refrigerante e a velocidade de corte, além da interação entre eles, apresentam influências significativas na temperatura ($p\text{-values} \ll 0,05$).

A influência das texturas na temperatura da interface cavaco-ferramenta pode ser verificada no gráfico de tendências da Figura 34. Este gráfico confirma o que já foi observado no gráfico da Figura 32, onde as ferramentas texturizadas apresentaram temperaturas mais baixas na interface, com reduções da temperatura média entre 6,9% a 9,1% em relação à ferramenta lisa. Entre as texturas não há diferenças significativas entre elas, mas a menor média de temperaturas é observada para as ferramentas com texturas paralelas à aresta de corte e a maior para as texturas a 45°.

Os valores de temperatura são influenciados pela área de contato e das condições de atrito na superfície de saída e, também, das condições lubri-refrigerantes. Com os resultados dos testes de temperatura a seco e com MQL, pode-se concluir que a aplicação de microtexturas nas ferramentas de corte (na superfície de saída) é efetiva na redução da

área de contato real, diminuindo a energia necessária para que ocorra o cisalhamento do cavaco e assim a temperatura de corte. Também demonstram que as microtexturas criam cavidades, que podem funcionar como reservatórios de lubrificantes, no caso o óleo, atuando diretamente na zona de contato cavaco-ferramenta, e por consequência reduzindo a temperatura e as texturas paralelas à aresta de corte demonstraram ser mais efetiva neste processo e as texturas a 45° menos efetivas.

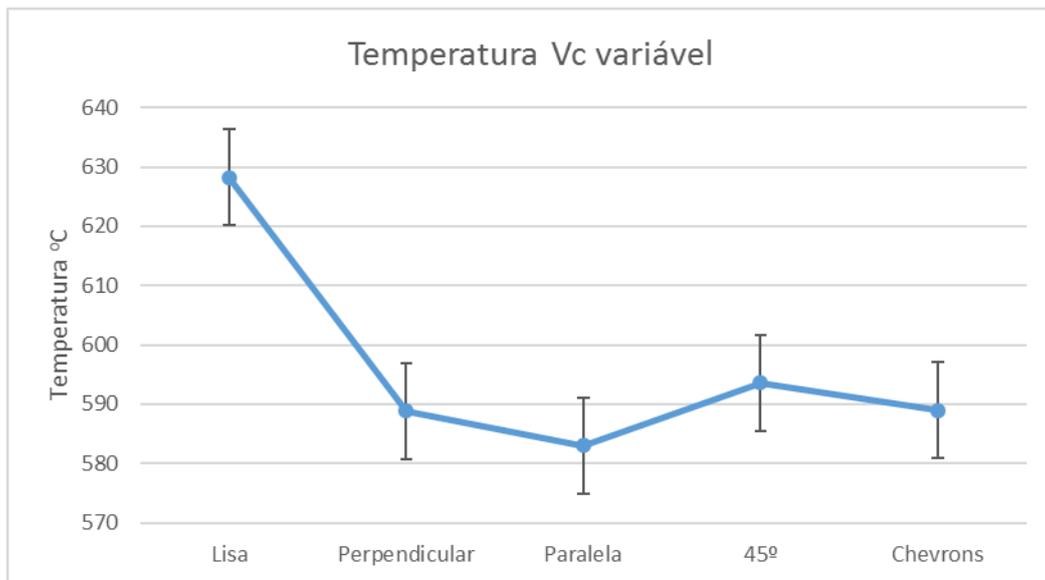


Figura 34. Influência das texturas na temperatura da interface cavaco-ferramenta nos ensaios com variação da velocidade de corte.

Olleak et. al. (2017) também encontraram consideráveis reduções de temperatura para as ferramentas com microtexturas, inclusive para as de canais paralelos à aresta de corte, porém, em seus ensaios, dentre as 5 microtexturas que testaram, as de canais paralelos não obtiveram o melhor desempenho e sim a ferramenta com a superfície de saída com microtextura em pontos.

O sistema lubri-refrigerante, isto é, usinagem a seco ou com MQL, também se apresenta com influência significativa na temperatura da interface cavaco-ferramenta, e o gráfico da Figura 35 mostra mais claramente este efeito.

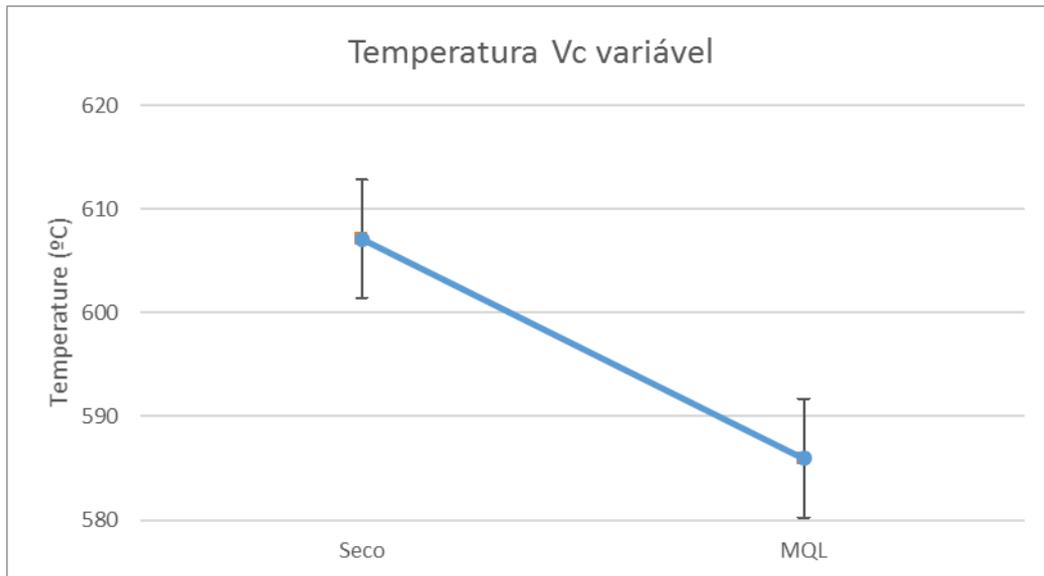


Figura 35. Efeito do sistema lubri-refrigerante nas temperaturas da interface cavaco-ferramenta, para os ensaios em que se variou a velocidade de corte.

Para os ensaios onde se variou a velocidade de corte, a condição a seco apresentou uma temperatura média de 607°C contra 586°C para a usinagem com MQL (-3,5%). As diferenças de temperatura dos ensaios na condição MQL em relação à condição à seco, para cada ferramenta foram de:

- Ferramenta lisa: -4,4%
- Microtextura Paralela: -3,8%
- Microtextura em “V”: -3,2%
- Microtextura 45°: -3,2%
- Microtextura Perpendicular: -2,7%

O efeito da velocidade de corte sobre a temperatura de usinagem é bem conhecido (MACHADO et al., 2015; TRENT e WRIGHT, 2000). O aumento da velocidade de corte aumenta a potência e a energia dispendida na usinagem, elevando proporcionalmente o calor gerado e a temperatura. O gráfico da Figura 36 apresenta este efeito mais claramente, onde o comportamento é praticamente linear.

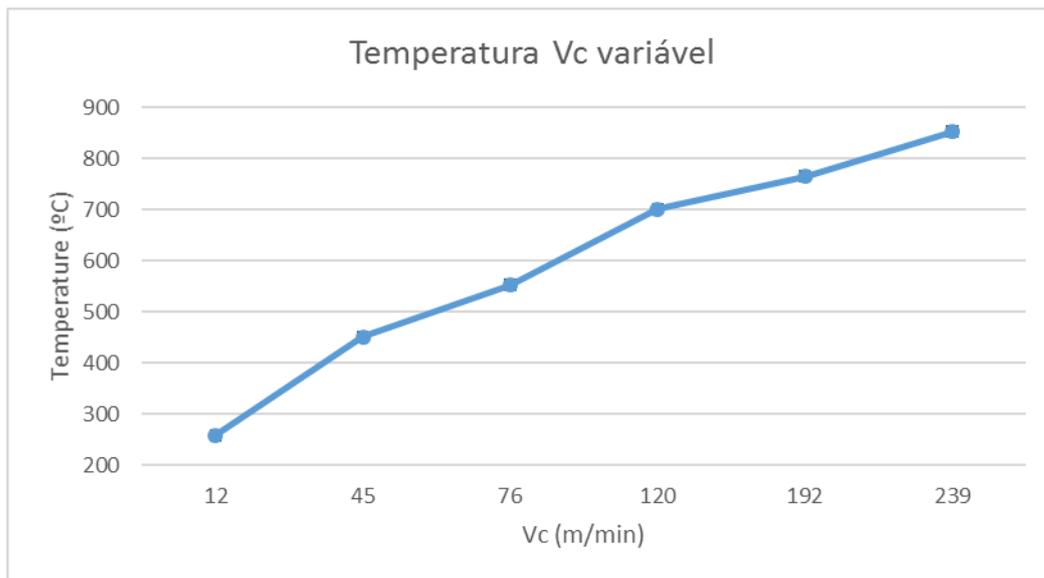


Figura 36. Efeito da velocidade de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta.

A Tabela 4 apresenta os resultados análise de variância - ANOVA da temperatura, considerando todos os testes (ferramentas texturizadas e sem textura e testes a seco e com MQL) quando se variou o avanço, para um nível de confiança de 95% e nível de significância de 5%. Com este índice, um parâmetro é considerado estatisticamente significativo quando o valor de probabilidade é menor que 5% ($p\text{-value} < 0,05$).

Tabela 4. ANOVA dos resultados de temperatura quando se variou o avanço

Efeito	Univariate Tests of Significance for Temperature Variando o avanço				
	SS	DF	MS	F	p-value
Interação	11818428	1	11818428	41709,41	0,000000
Textura	10259	4	2565	9,05	0,000176
Lubrificação	3220	1	3220	11,37	0,002754
f (mm/rev)	212697	2	106349	375,32	0,000000
Error	6234	22	283		

A tabela confirma a influência significativa de todos os parâmetros na temperatura da interface cavaco-ferramenta, também quando se variou o avanço. A influência das texturas é mostrada no gráfico da Figura 37, onde se confirma que a ferramenta com textura paralela à aresta de corte foi a mais efetiva em reduzir a temperatura da interface cavaco ferramenta e a ferramenta com texturas perpendiculares a menos efetiva,

diferentemente de quando se variou a velocidade de corte, onde a menos efetiva foi a ferramenta com texturas a 45°.

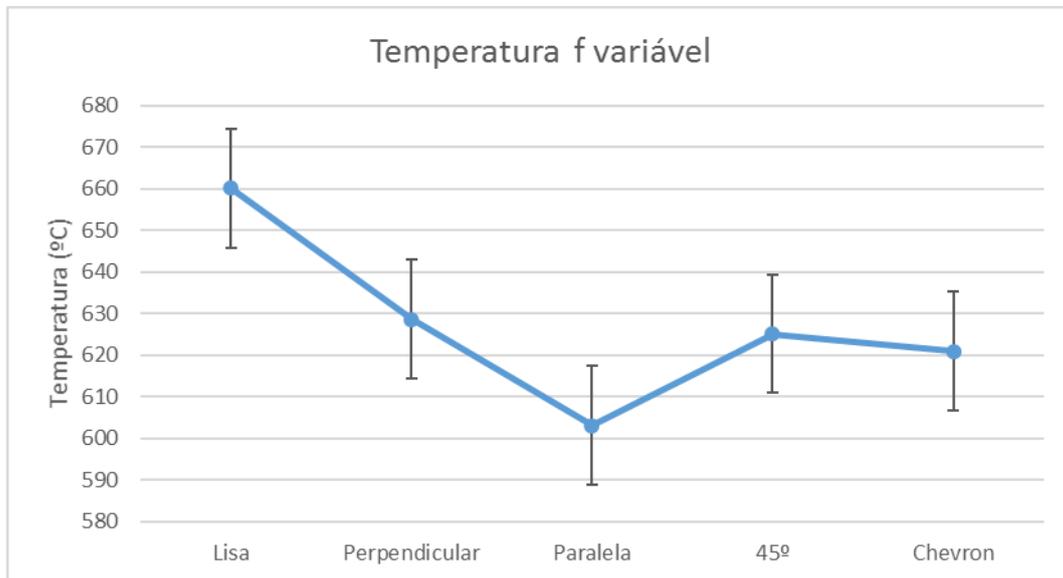


Figura 37. Influência das texturas na temperatura da interface cavaco-ferramenta nos ensaios com variação do avanço.

Para os ensaios onde se variou o avanço, a condição a seco apresentou uma temperatura média de 638°C contra 617°C para a usinagem com MQL (-3,3%). As diferenças de temperatura dos ensaios na condição MQL em relação à condição à seco, para cada ferramenta foram de:

- Ferramenta lisa: -1,6%
- Microtextura Paralela: -2,4%
- Microtextura em “V”: -4,6%
- Microtextura 45°: -4,9%
- Microtextura Perpendicular: -2,8%

A Figura 38 mostra a influência geral do avanço na temperatura da interface cavaco-ferramenta, onde é nítido o crescimento da temperatura com o aumento desta variável. Com o aumento do avanço, há um aumento direto na espessura de corte e, portanto, na área da seção de corte, aumentando a energia necessária para formar o cavaco e, consequentemente, o calor gerado e a temperatura de usinagem (MACHADO, et al., 2015).

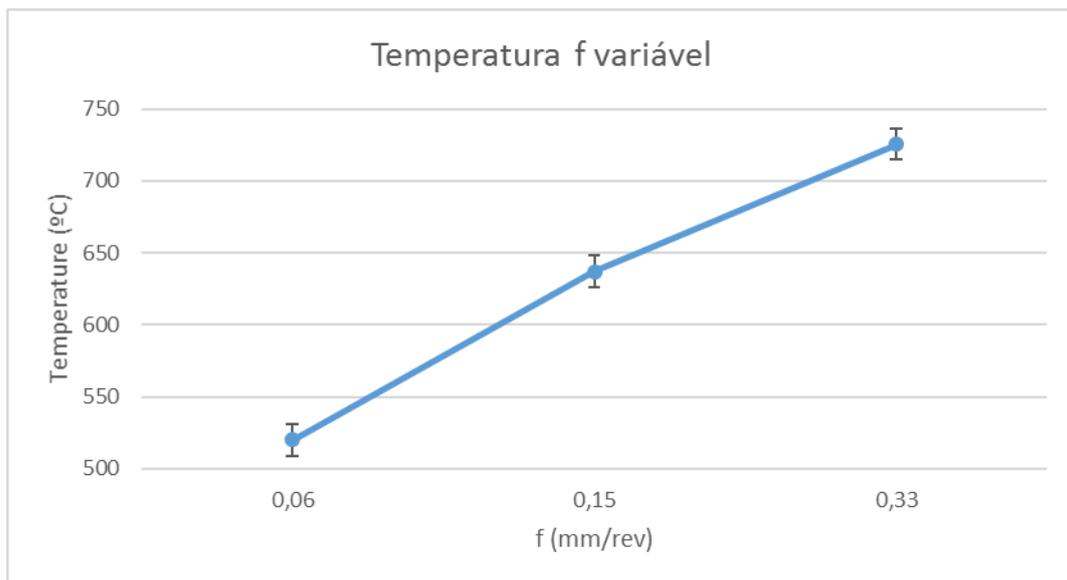


Figura 38. Efeito do avanço na temperatura da interface cavaco-ferramenta.

4.2 RESULTADOS DE FORÇA DE USINAGEM

Esses ensaios comparam o comportamento da força de usinagem (soma vetorial das componentes de força de corte, de avanço e passiva), valores médios, obtidos na usinagem com as ferramentas com diferentes microtexturas e sem microtextura, a seco e com MQL, quando se variou a velocidade de corte e o avanço. Os resultados gerais são mostrados nas Tabelas A.5 a A.8, do Apêndice 2.

Primeiramente, as forças de usinagem foram estudadas com variação da velocidade de corte (de 30 até 360 m/min), fixando-se o avanço em 0,15 mm/rot e a profundidade de corte em 1,0 mm. Os ensaios foram realizados a seco e com MQL, cujos resultados são apresentados, respectivamente, nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 39 A e B.

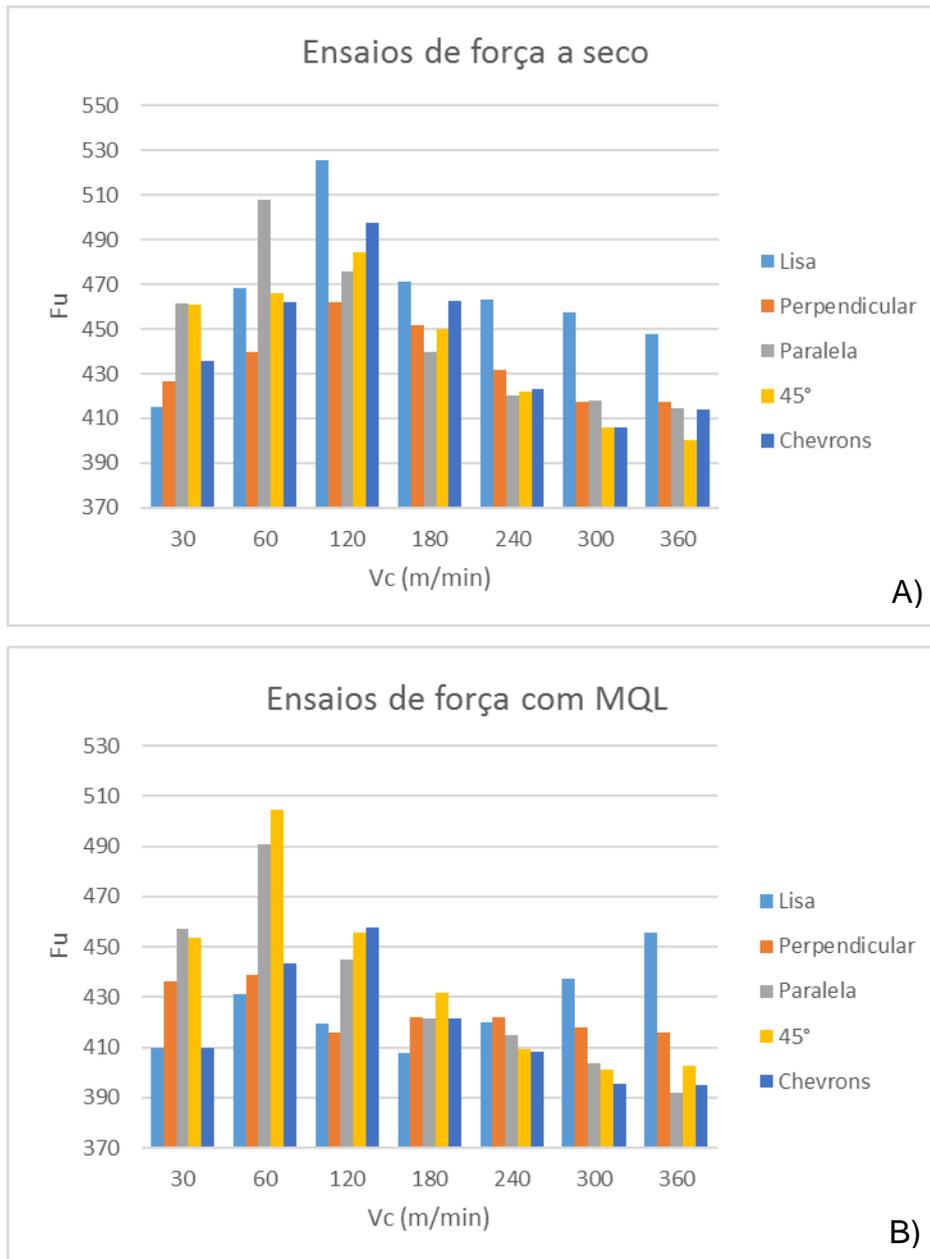


Figura 39. Teste de força variando a velocidade de corte. A) a seco; B) com MQL.

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise de variância – ANOVA da força de usinagem, considerando todos os testes (ferramentas texturizadas e sem textura e testes a seco e com MQL) quando se variou a velocidade de corte, para um nível de confiança de 95% e nível de significância de 5%. Com este índice, um parâmetro é considerado estatisticamente significativo quando o valor de probabilidade é menor que 5% (p-value < 0,05).

Tabela 5. ANOVA dos resultados de força de usinagem quando se variou a velocidade de corte.

Efeito	Univariate Tests of Significance for Machining Force Variando a velocidade de corte				
	SS	DF	MS	F	p-value
Interação	13366328	1	13366328	30158,70	0,000000
Textura	2324	4	581	1,31	0,276606
Lubrificação	6207	1	6207	14,01	0,000420
Vc	26103	6	4350	9,82	0,000000
Error	25706	58	443		

O teste indica que apenas a velocidade de corte e o sistema lubri-refrigerante tiveram influências significativas na força de usinagem. A textura só apresenta influência para um nível de confiança abaixo de 73% (p-value = 0,276606).

Observa-se que a força de usinagem inicialmente cresce até a velocidade de corte de 60 m/min, e depois diminui à medida que se aumenta a velocidade de corte além deste valor. Trata-se de uma situação clara da presença da APC – aresta postiça de corte, que aparece nas baixas velocidades, quando se usina material que contenha segunda fase, caso do aço ABNT 1020 estudado. A força de usinagem diminui à medida que as dimensões da APC crescem, atingindo dimensões máximas (forças mínimas), o que parece neste caso, para ambas as condições lubri-refrigerantes (Figura 39 A e B), ser em torno de 30 m/min ou inferior. A partir deste valor, o crescimento da velocidade faz diminuir as dimensões da APC, aumentando a força, até que atinge a velocidade crítica, onde a APC desaparece. Neste caso, a velocidade crítica aparenta estar próxima de 120 m/min para a usinagem a seco e próxima de 60 m/min para a usinagem com MQL, pois a força de usinagem atingiu valores máximos nestas velocidades (MACHADO *et al.*, 2015; TRENT *et al.*, 1963). Estes resultados indicam que o fluido de corte aplicado por MQL reduziu o campo de velocidade onde a APC se faz presente, incluindo a velocidade crítica. A partir do ponto máximo, com o aumento da velocidade de corte, devido à maior geração de calor, aumento da temperatura (como já verificado na análise dos resultados de temperatura com variação da velocidade de corte) e consequente redução da resistência do material, a força de usinagem diminui (MACHADO *et al.*, 2015).

O gráfico de tendências considerando todos os resultados de força de usinagem, quando se variou a velocidade de corte é mostrado na Figura 40. Trata-se de um comportamento típico, onde a APC está presente nas baixas velocidades (velocidade crítica entre 60 e 120 m/min) e nas altas velocidades, o aumento desta variável faz reduzir

as forças.

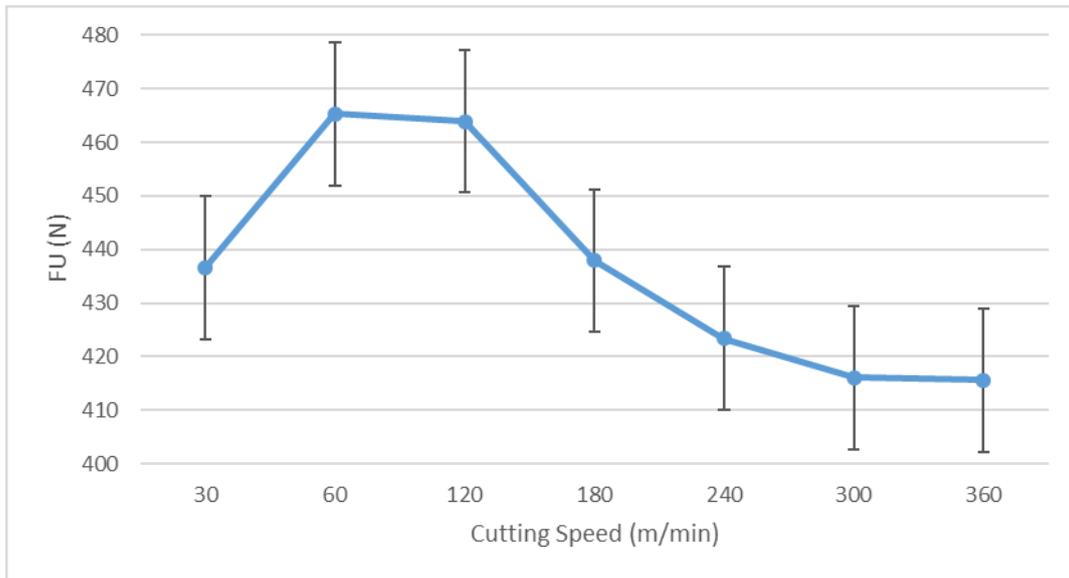


Figura 40. Efeito da velocidade de corte na força de usinagem.

Nota-se, também, um comportamento diferente entre as ferramentas. Na faixa de velocidade de corte com APC, as ferramentas com texturas paralelas e a 45° com a aresta de corte apresentam os maiores valores de força, indicando que estas texturas contribuem para a redução das dimensões da APC. As ferramentas, lisa e com textura perpendicular à aresta de corte, apresentam as menores forças de usinagem, no geral, indicando que a APC, possivelmente, apresenta as maiores dimensões com estas ferramentas.

Fora do campo da APC, observa-se que a ferramenta lisa, no geral, apresenta as maiores forças de usinagem. Avaliando os valores médios de força de usinagem para os ensaios a seco, com velocidade de corte acima de 180m/min (com menores chances da ocorrência de APC), observa-se as seguintes variações de força de usinagem para as ferramentas microtexturizadas, quando comparadas com a ferramenta lisa:

- Microtextura em 45°: -8,7%
- Microtextura paralela: -8,0%
- Microtextura em “v” ou *chevrons*: -7,2%
- Microtextura perpendicular: -6,5%

Avaliando os valores médios de força de usinagem para os ensaios com MQL, com velocidade de corte acima de 180m/min, observa-se as seguintes variações de força

de usinagem para as ferramentas microtexturizadas, quando comparadas com a ferramenta lisa:

- Microtextura em “v” ou *chevrons*: -5,8%
- Microtextura paralela: -5,2%
- Microtextura em 45°: -4,4%
- Microtextura perpendicular: -2,5%

Apesar de não apresentar influência significativa, o gráfico da Figura 41 mostra as tendências de comportamento da força de usinagem em função das texturas utilizadas.

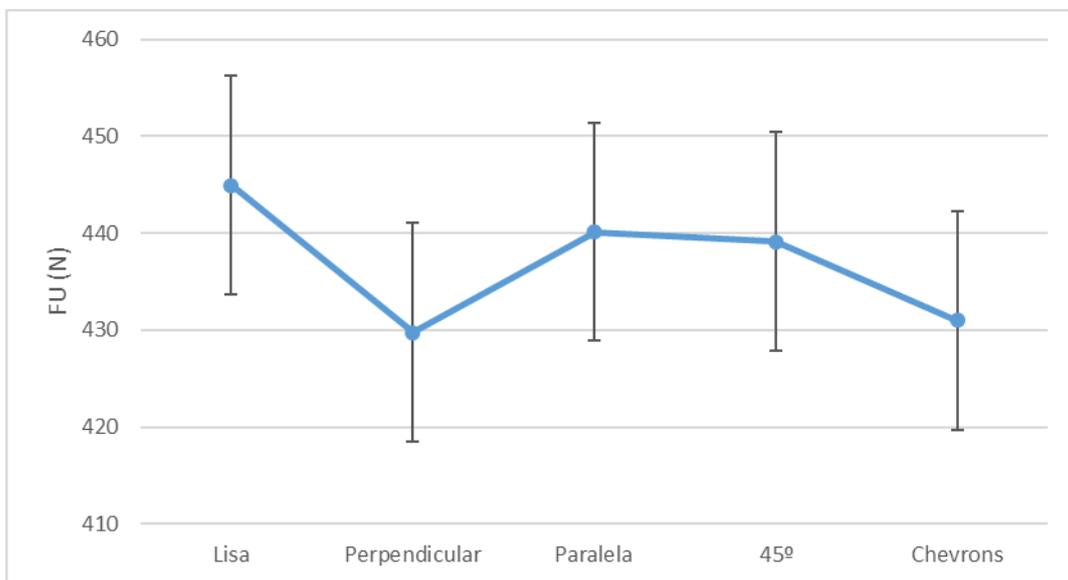


Figura 41. Efeito da textura da ferramenta na força de usinagem.

Esta figura mostra que considerando todos os testes com variação da velocidade de corte, a ferramenta lisa apresentou os maiores valores médios de força de usinagem e a microtextura perpendicular e do tipo *chevrons* os menores. Assim, a microtextura pode reduzir a força de usinagem, principalmente para valores de velocidades de corte superiores a 180 m/min (Figura 39), onde as microtexturas a 45° e paralelas à aresta de corte apresentaram os melhores resultados, respectivamente, 8,7% e 8,0% de redução para os ensaios a seco. Ademais, para os ensaios com MQL as microtexturas em “v” (*chevrons*) e paralelas tiveram os melhores resultados e apresentaram, respectivamente, 5,8% e 5,2% de redução.

Este comportamento mostra que as texturas podem contribuir em duas frentes para reduzir as forças (i) – reduzindo a área efetiva de contato cavaco-ferramenta e (ii) –

facilitando o processo de cisalhamento na zona de fluxo, seja contribuindo com a ancoragem de material do cavaco (que preenche as cavidades proporcionadas pela textura), seja proporcionando maior lubrificação quando usinando com MQL (com a textura servindo de alojamento de fluido).

A usinagem com MQL reduziu a força de usinagem em relação à usinagem a seco, para cada uma das ferramentas:

- Ferramenta lisa: -6,4%
- Microtextura em “v” (Chevrons): -5,0%
- Microtextura Paralela: -3,6%
- Microtextura Perpendicular: -2,4%
- Microtextura em 45°: -2,0%

A Figura 42 mostra que em média, a força de usinagem cai de 446 N para 428 N (-4,0%), quando se usina com a aplicação do fluido de corte aplicado por MQL, ao invés da usinagem a seco.

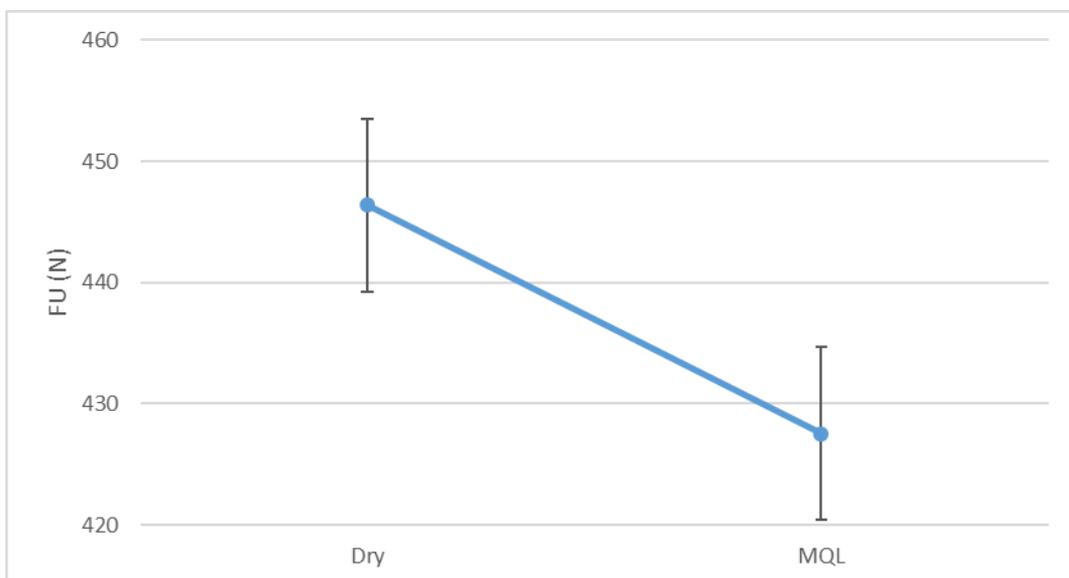


Figura 42. Efeito do fluido aplicado por MQL na força de usinagem.

Os resultados dos testes de força de usinagem (soma das componentes de força de corte, avanço e passiva) variando o avanço (de 0,05 a 0,35 mm/rot) com a velocidade de corte fixa em 120 m/min e a profundidade de corte em 1,0 mm, na condição a seco e com MQL, são apresentados, respectivamente, na Figura 43 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A e B.

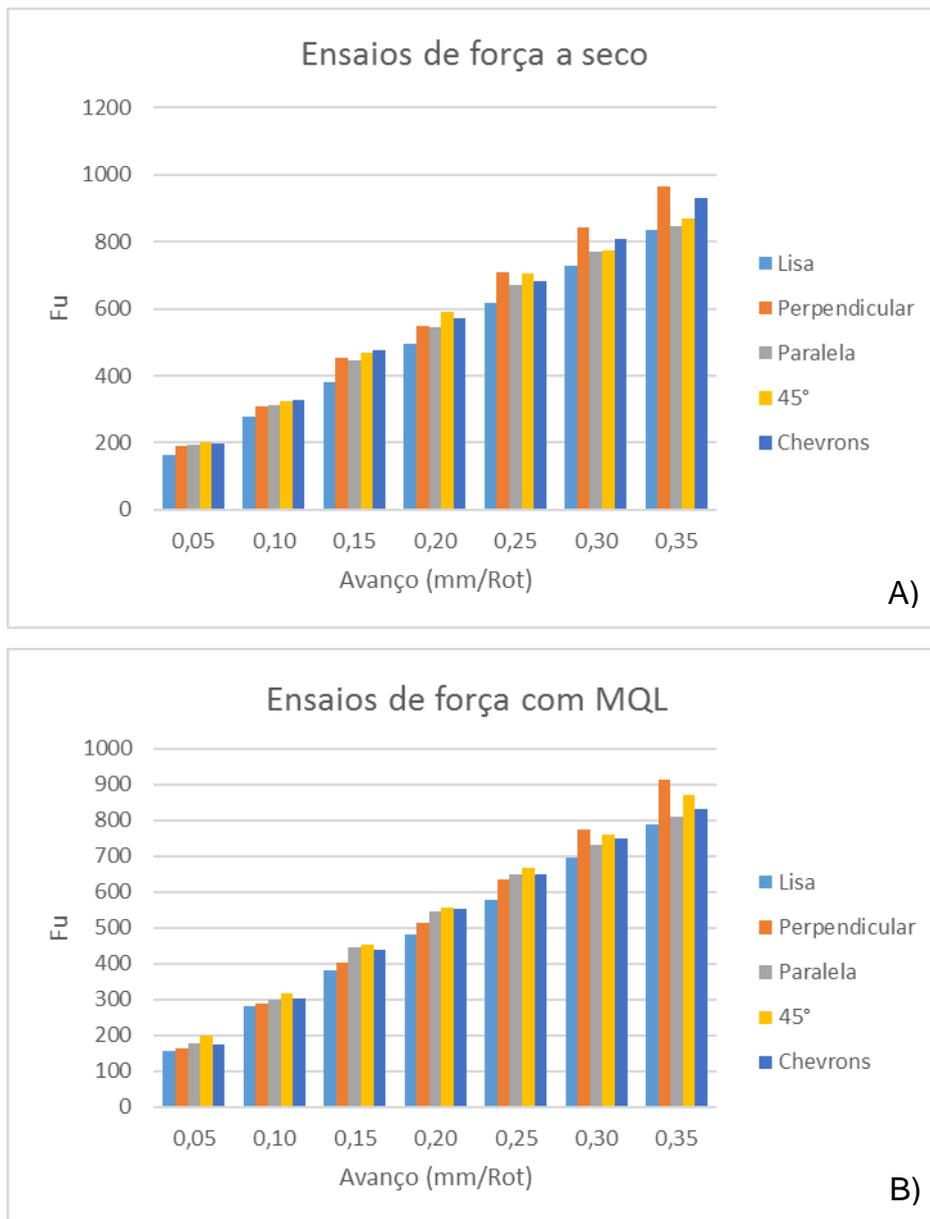


Figura 43. Teste de força variando o avanço. A) a seco; B) com MQL.

Nota-se que o comportamento da força de usinagem aumenta com o aumento do valor do avanço, como é de se esperar, pois o avanço aumenta a espessura do cavaco e a área da seção de corte (MACHADO, et al., 2015).

Observa-se que tanto nos testes a seco, como utilizando o fluido por MQL a ferramenta de corte lisa apresentou melhores resultados do que as demais ferramentas microtexturizadas.

A Tabela 7.4 apresenta os resultados da análise de variância – ANOVA da força de usinagem, considerando todos os testes (ferramentas texturizadas e sem textura e testes a seco e com MQL) quando se variou o avanço, para um nível de confiança de 95% e

nível de significância de 5%. Com este índice, um parâmetro é considerado estatisticamente significativo quando o valor de probabilidade é menor que 5% (p-value < 0,05).

Tabela 6. ANOVA dos resultados de força de usinagem quando se variou o avanço.

Efeito	Univariate Tests of Significance for Machinig force - Variando o avanço				
	SS	DF	MS	F	p-value
Interação	20062810	1	20062810	39264,69	0,000000
Textura	40063	4	10016	19,60	0,000000
Lubrificação	14090	1	14090	27,58	0,000002
f	3644979	6	607497	1188,92	0,000000
Error	29636	58	511		

Observa-se que todas os parâmetros considerados e a interação deles apresentam influências significativas na força de usinagem, para um nível de confiabilidade de 95% (p-value << 0,05).

O comportamento da força de usinagem com o avanço, considerando todos os resultados de força de usinagem, é mostrado na Figura 44.

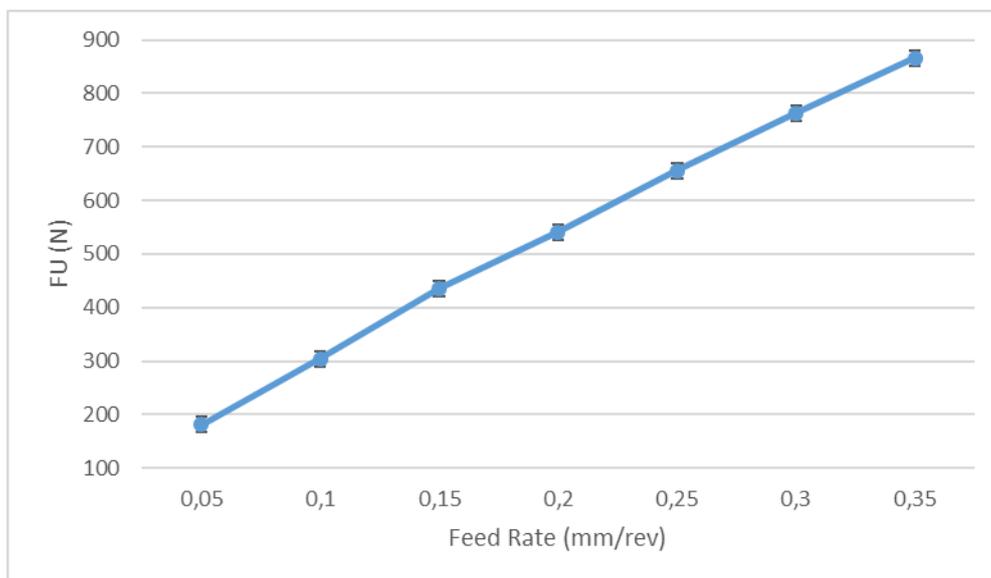


Figura 44. Efeito do avanço na força de usinagem.

Considerando todos os testes com variação do avanço, o efeito da microtexturização das superfícies de saída das ferramentas nas forças de usinagem é apresentado na Figura 45. A ferramenta lisa apresenta pelo menos 40 N a menos na força de usinagem, em relação às ferramentas texturizadas.

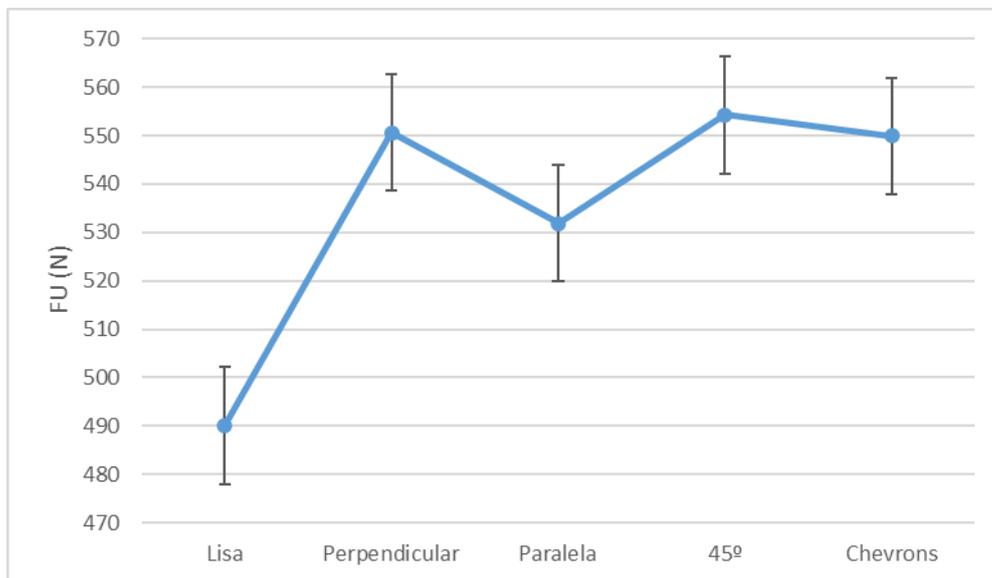


Figura 45. Efeito da microtexturização das ferramentas na força de usinagem.

Quando se avalia a variação média da força de usinagem para os ensaios a seco (ver Tabela A.7 do Apêndice 2), verifica-se que as ferramentas microtexturizadas apresentam valores maiores que a ferramenta lisa, nos seguintes termos:

- Microtextura perpendicular: +14,8%
- Microtextura em “V” (*chevrons*): +14,1%
- Microtextura em 45°: +12,4%
- Microtextura paralela: +8,1%

Quando se avalia a variação média da força de usinagem durante os ensaios com MQL (ver Tabela A.8 do Apêndice 2), verifica-se que as ferramentas microtexturizadas também apresentam valores maiores que a ferramenta lisa, da seguinte maneira:

- Microtextura em 45°: +13,8%
- Microtextura em “V” (*chevrons*): +10,2%
- Microtextura perpendicular: +9,8%
- Microtextura paralela: +8,9%

Esses resultados foram diferentes daqueles apresentados quando se variou a velocidade de corte (Figura 39), onde a ferramenta lisa apresentou forças de usinagem superiores às ferramentas texturizadas (~5N). Ao se variar o avanço, aumenta-se a área da seção de core e também a área de contato cavaco-ferramenta. Assim, para grandes áreas de contato a textura se mostra ineficiente para reduzir a força. A hipótese é de que a textura, que aparentemente reduz a área real de contato cavaco-ferramenta, deveria reduzir a força de usinagem (MACHADO et al., 2015; TREN e WRIGHT, 2000). Mas por outro lado, já foi verificado (Figura 37) que a textura reduz a temperatura da interface-cavaco-ferramenta quando se considerou os ensaios variando-se o avanço. A redução da temperatura da interface implica em manutenção da resistência do material em níveis mais elevados, sendo a provável explicação para o aumento da força de usinagem.

Ao se passar da usinagem a seco para a usinagem com aplicação de um fluido de corte por MQL força de usinagem diminuiu em média 29 N (passou de 550 N para 521 N). As reduções em favor da usinagem com MQL para cada tipo de ferramenta usada foram:

- Microtextura perpendicular: -8,2%
- Microtextura em “V” (*chevrons*): -7,3%
- Ferramenta Lisa: -4%
- Microtextura paralela: -3,3%
- Microtextura em 45°: -2,7%

A literatura já sinalizou resultados desfavoráveis para as ferramentas microtexturizadas, em relação ao comportamento das forças de usinagem. Olleak et al. (2017), em seus modelos utilizando elementos finitos, encontraram para a microtextura paralela um aumento de 13% na força de usinagem em relação a ferramenta lisa. Nesta pesquisa foram encontrados aumentos de 14,8% para os ensaios a seco e 9,8% para os ensaios com MQL, sendo esta a ferramenta com os maiores valores de força de usinagem entre todas utilizadas (perpendicular, pontos, diagonal com pontos, 45° e paralelas).

4.3 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS FERRAMENTAS ANTES E APÓS A USINAGEM

As superfícies das ferramentas foram caracterizadas no microscópio eletrônico de varredura – MEV, antes e depois dos ensaios. O objetivo é verificar as condições das texturas e eventuais materiais aderidos após a usinagem nos testes de temperatura e de força de usinagem. A Figura 46 apresenta as fotos das ferramentas com microtexturas na forma de canais perpendiculares à aresta principal de corte, utilizadas nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço e a velocidade de corte a seco e com MQL.

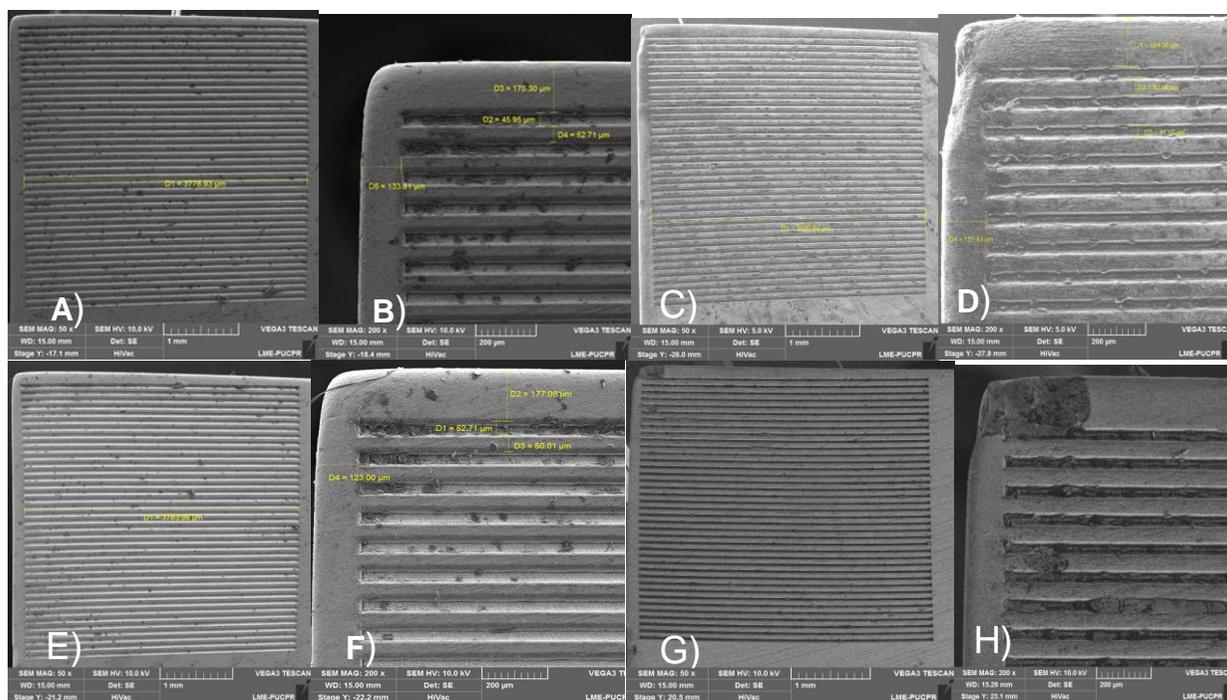


Figura 46. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e

D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

A Figura 47 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas com microtexturas na forma de canais perpendiculares à aresta principal de corte, utilizadas nos ensaios de força quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

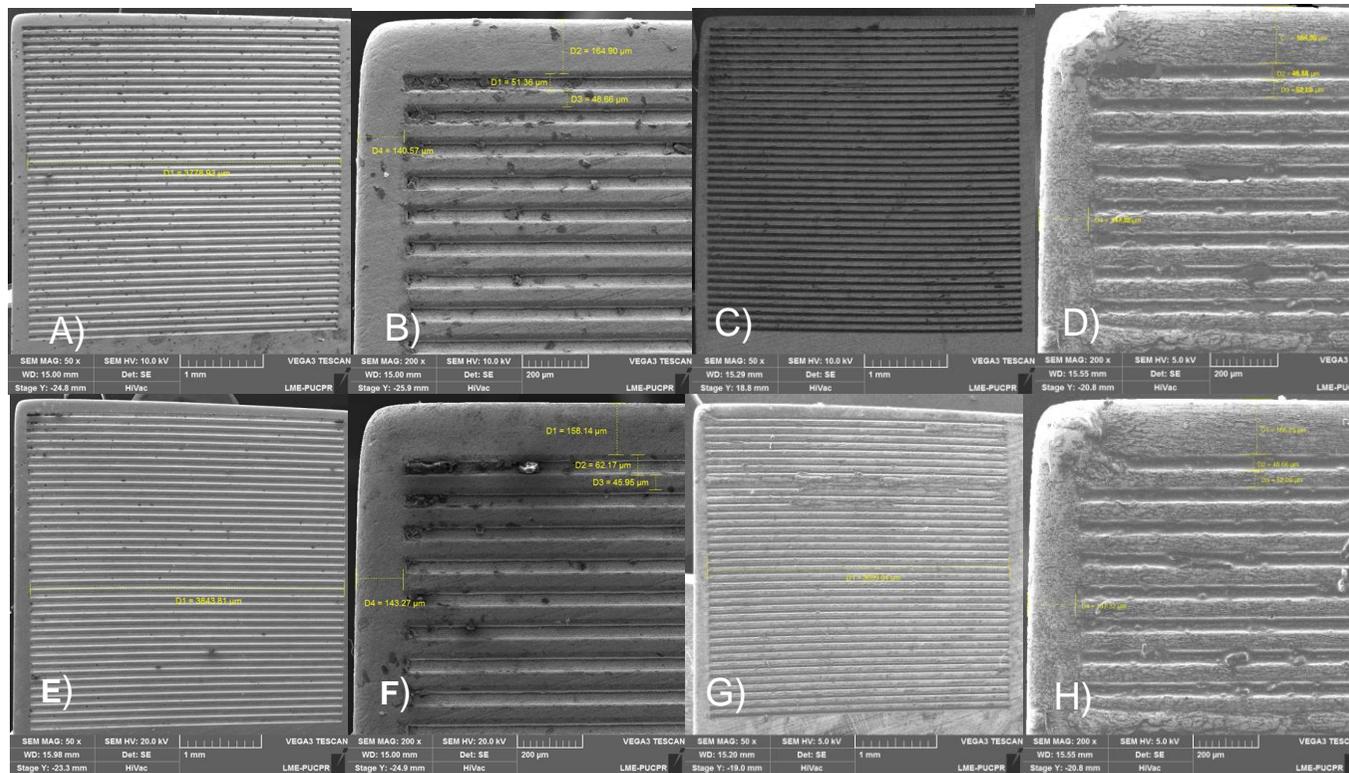


Figura 47. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à aresta principal de corte utilizada nos ensaios de força quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação perpendicular à aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

Observa-se que tanto as ferramentas utilizadas nos testes de temperatura como nos de forças, com microtexturas perpendiculares à aresta principal de corte, apresentam alguns fragmentos (debris) nos canais da textura, originados no processo de texturização a laser (onde envolve ablação, fusão e refusão de material). Após a usinagem, estas ferramentas apresentaram pouco material da peça aderido nos canais. Este sentido de texturização dos canais não favorece adesão, pois são paralelos ao fluxo de movimentação do cavaco. Algumas ferramentas, principalmente aquelas utilizadas quando se variou o avanço, nos dois tipos de ensaios (temperatura e força) apresentaram alguns danos na aresta, mas mantiveram a integridade dos canais texturizados. Os tempos de corte, entretanto foram curtos para cada condição de corte utilizada.

A Figura 48 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas com microtexturas na forma de canais paralelos à aresta principal de corte, utilizadas nos ensaios de temperatura, quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

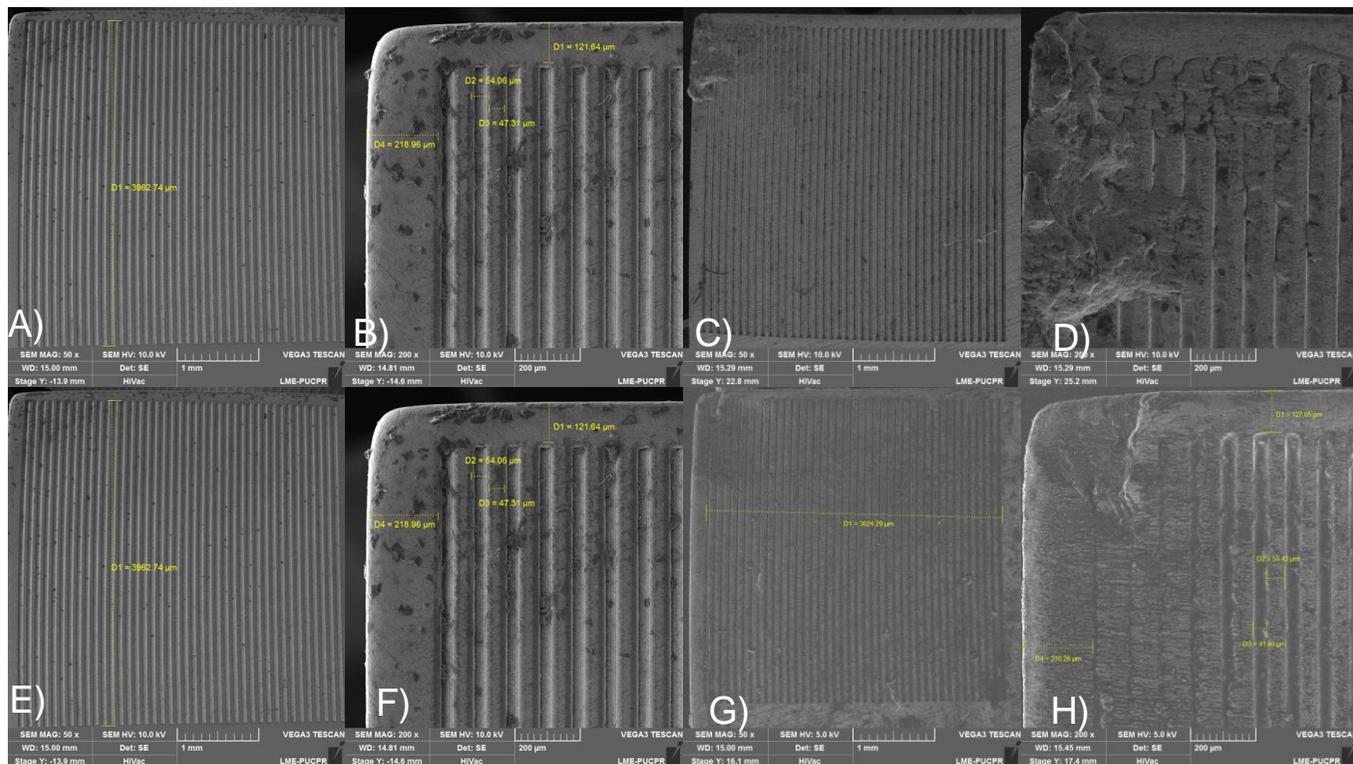


Figura 48. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

A Figura 49 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas com microtexturas na forma de canais paralelos à aresta principal de corte, utilizadas nos ensaios de força, quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

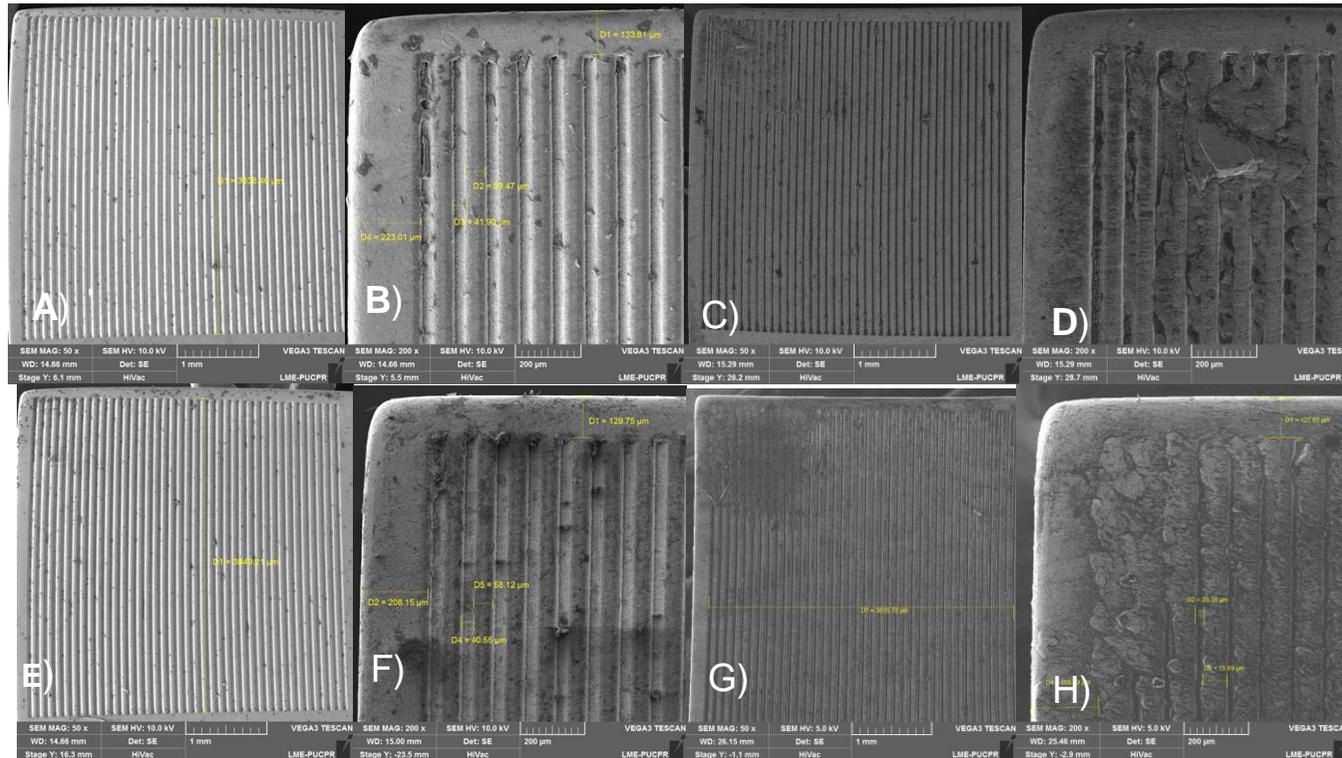


Figura 49. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de força quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação paralela a aresta principal de corte utilizada nos ensaios de força quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

Observa-se que as ferramentas com microtexturas paralelas à aresta principal de corte utilizadas nos ensaios de temperatura e força também apresentam fragmentos (debris) nos canais, originados no processo de texturização a laser (onde envolve ablação, fusão e refusão de material). Após a usinagem nota-se material da peça aderido nas texturas em quantidades bem superiores do que as ferramentas com texturas perpendiculares à aresta principal de corte. Houve também alguns danos (quebras) dos canais, principalmente nas ferramentas utilizadas na variação do avanço, indicando que pode haver uma dimensão ideal da textura para cada condição de corte. Maiores avanços exigem maior resistência nestas texturas, uma vez que a espessura do cavaco é maior. Salienta-se que este tipo de textura paralela à aresta principal de corte foi a que apresentou menores valores de temperaturas na interface cavaco ferramenta. Essas texturas, portanto, favorecem o cisalhamento do cavaco na zona de fluxo, consumindo menor energia e gerando menor quantidade de calor.

A Figura 50 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas com microtexturas na forma de canais a 45° com a aresta principal de corte, utilizadas nos ensaios de temperatura, quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

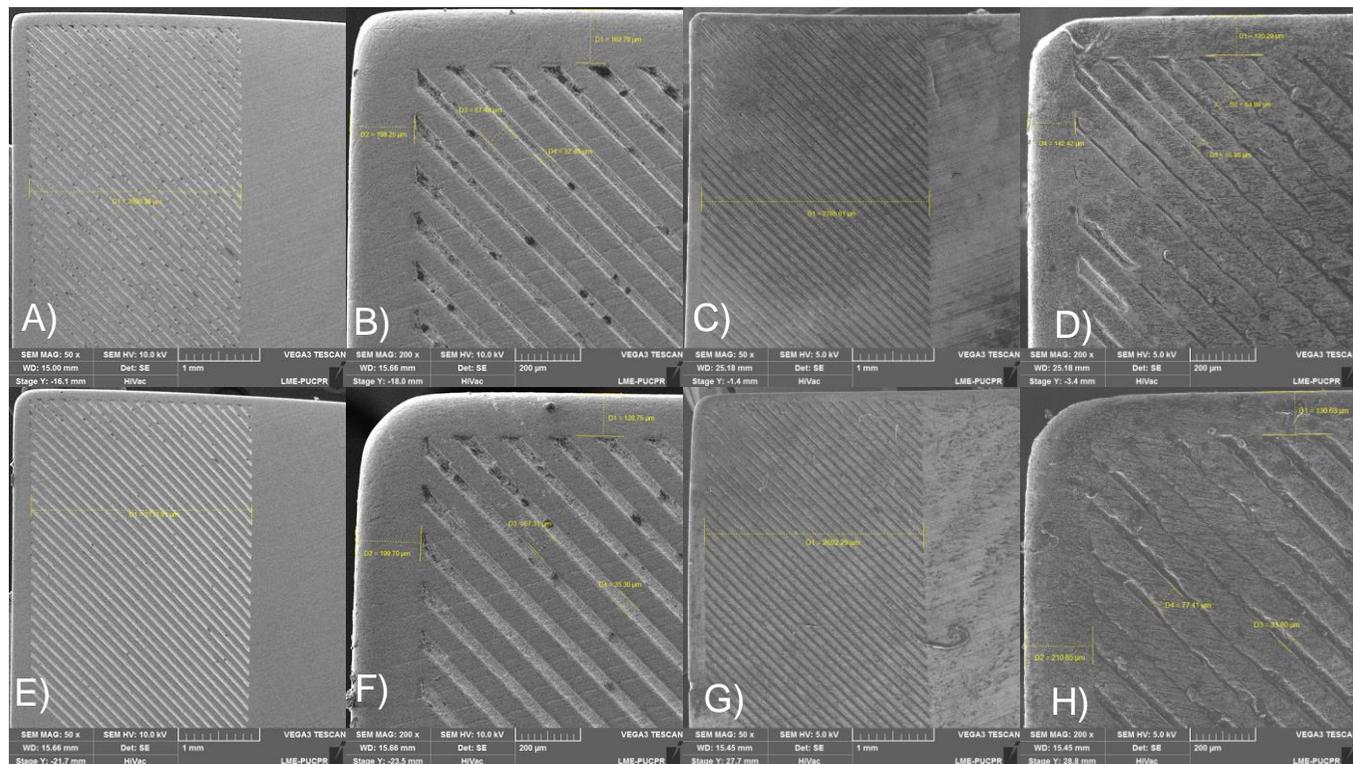


Figura 50. Ferramenta de corte com microtexturas de canais com orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de temperatura, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de temperatura, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

A Figura 51 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas com microtexturas na forma de canais a 45° com a aresta principal de corte, utilizadas nos ensaios de força, quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

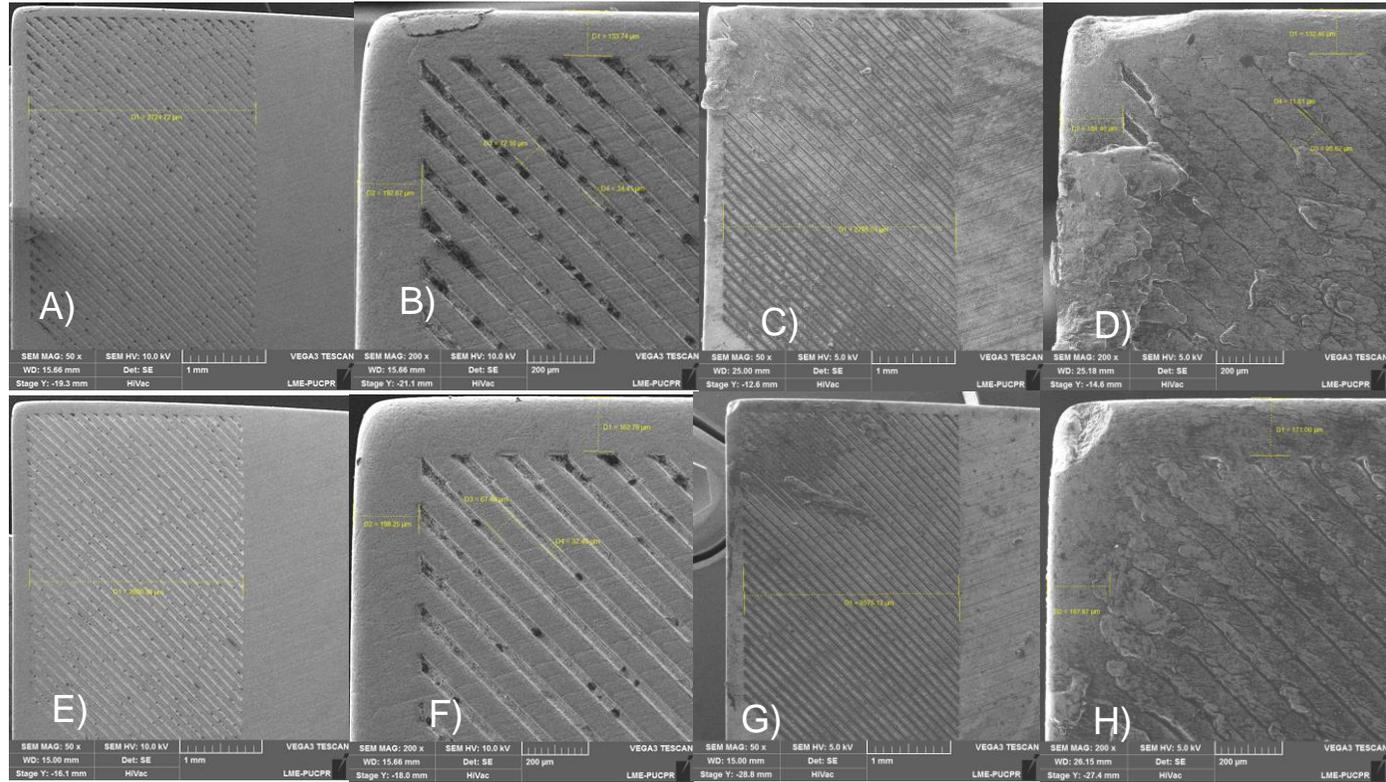


Figura 51. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de força, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em 45° com a aresta de corte, utilizada nos ensaios de força, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

Observa-se a presença de vários fragmentos (debris) nos canais da textura a 45°, originados no processo de texturização a laser (onde envolve ablação, fusão e refusão de material). Após a usinagem os canais são fortemente preenchidos com material da peça, indicando que esta microtextura altera as condições tribológicas da interface cavaco-ferramenta, mas os resultados dos ensaios de temperatura e força indicam que esta textura não é a mais adequada. Notam-se alguns microlascamentos das arestas das ferramentas com microtexturas de canais a 45° utilizadas nos ensaios de temperatura e força, sendo mais acentuados nas ferramentas usadas quando se variou o avanço.

A Figura 52 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas com microtexturas em “V”(Chevrons), utilizadas nos ensaios de temperatura, quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

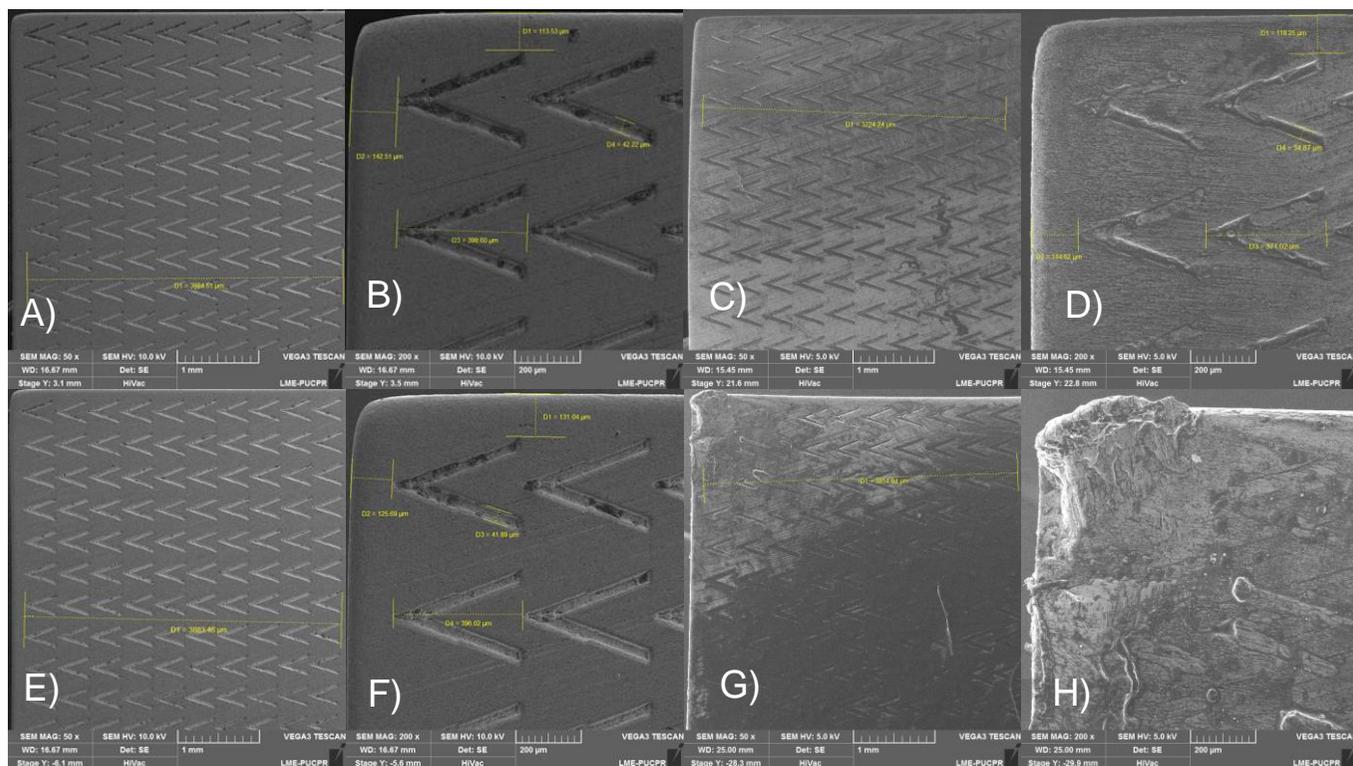


Figura 52. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou o avanço. Antes dos ensaios:

A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV.

Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizada nos ensaios de temperatura quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios:

E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

A Figura 53 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas com microtexturas em “V”(Chevrons), utilizadas nos ensaios de força, quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

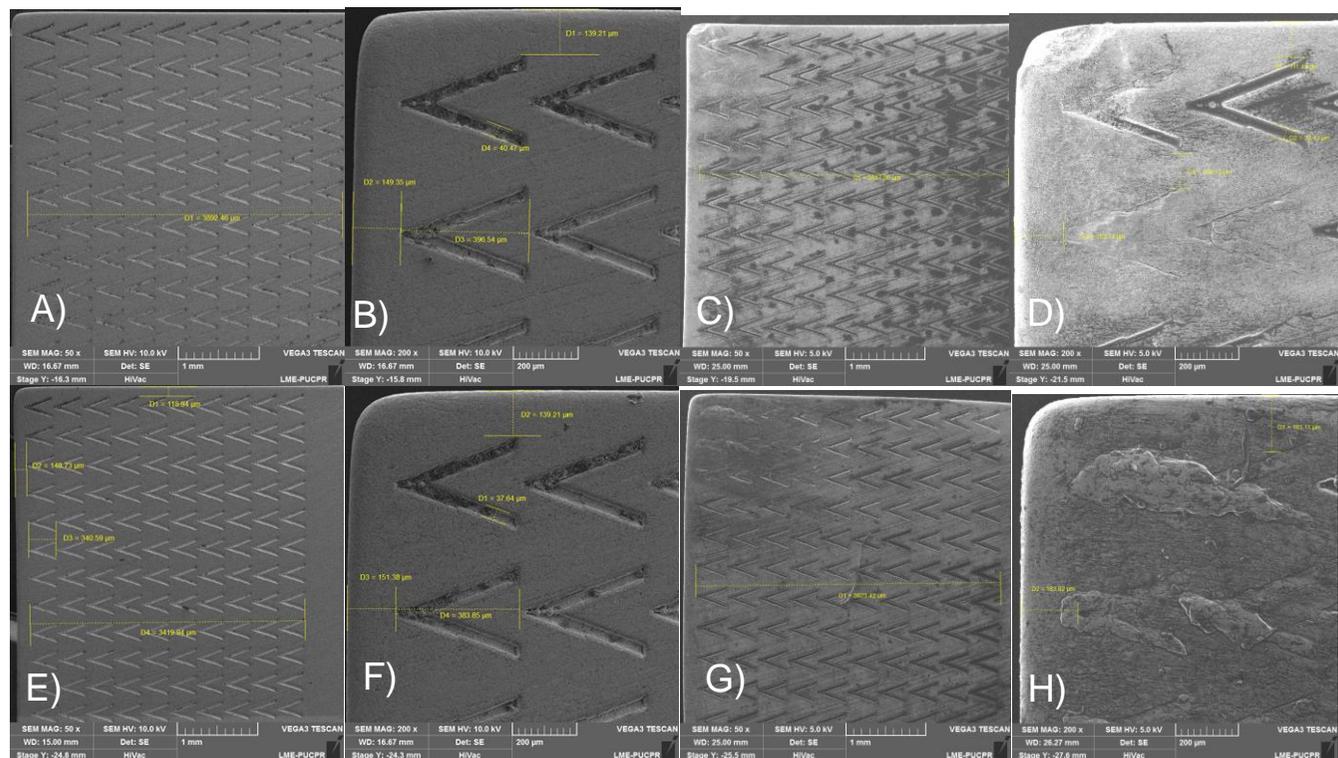


Figura 53. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizadas nos ensaios de força, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV. Ferramenta de corte com microtexturas de orientação em “V” utilizadas nos ensaios de força, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

Detalhes das superfícies de saída das ferramentas com microtexturas em “V” mostram fragmentos (debris) no interior das texturas, originados no processo de texturização a laser (onde envolve ablação, fusão e refusão de material). Após a usinagem observa-se que as

microtexturas são totalmente preenchidas com material da peça, sendo que em alguns casos esse material aderido excede as texturas, ocupando uma área considerável das superfícies de saída das ferramentas, alterando as condições tribológicas da interface cavaco-ferramenta. A ferramenta

que foi utilizada nos ensaios de força, quando se variou o avanço apresentou um microlascamentos na aresta. Esta pequena avaria foi restrita a esta ferramenta.

A Figura 54 apresenta as fotos obtidas no MEV das ferramentas lisas utilizadas nos ensaios de temperatura e força, na condição a seco e com MQL, quando se variou o avanço e a velocidade de corte.

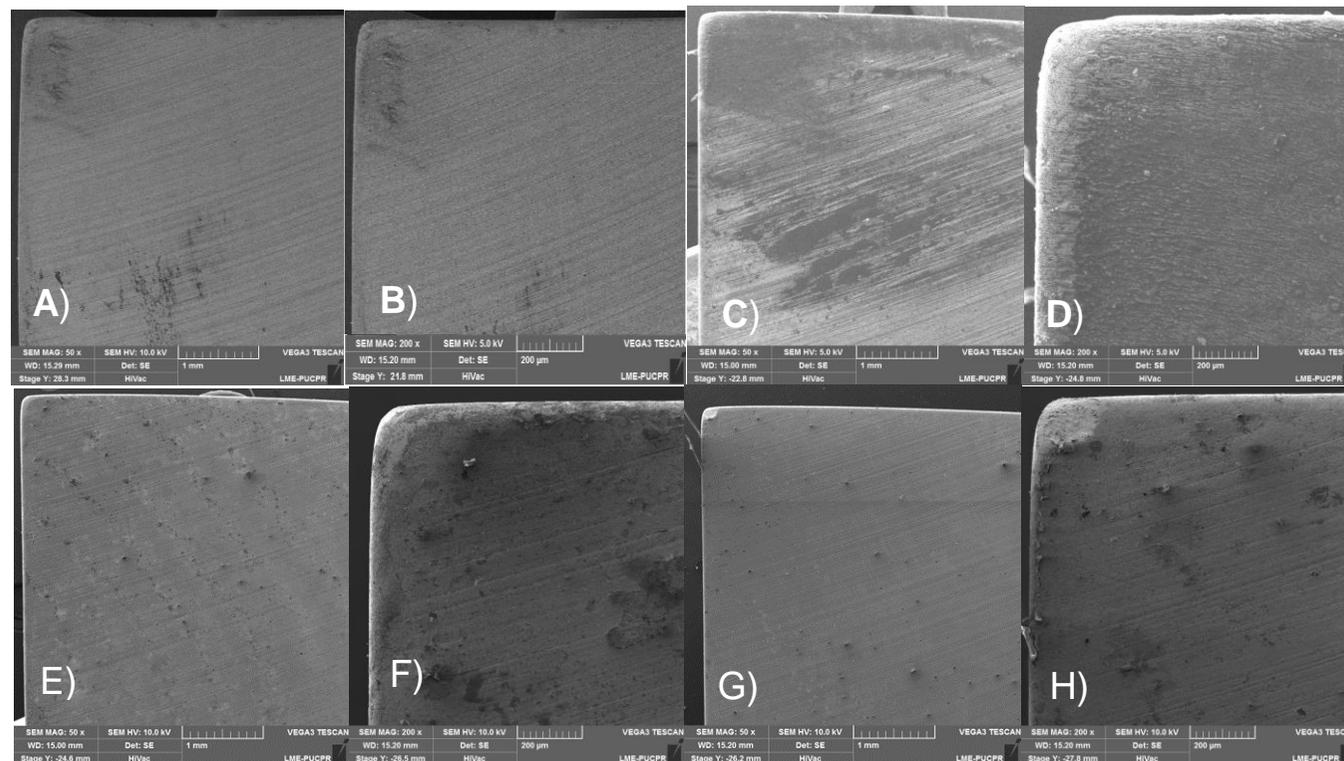


Figura 54. Ferramenta de corte lisa utilizada nos ensaios de temperatura e força, a seco e com MQL, quando se variou o avanço. Antes dos ensaios: A) Ampliação de 50x no MEV e B) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: C) Ampliação de 50x no MEV e D) Ampliação de 200x no MEV.

Ferramenta de corte lisa utilizada nos ensaios de temperatura e força, a seco e com MQL, quando se variou a velocidade de corte. Antes dos ensaios: E) Ampliação de 50x no MEV e F) Ampliação de 200x no MEV. Depois dos ensaios: G) Ampliação de 50x no MEV e H) Ampliação de 200x no MEV.

As ferramentas lisas, antes de serem usadas na usinagem apresentam marcas naturais do processo de retificação feito com rebolo de CBN. Após a usinagem, estas ferramentas praticamente não apresentaram material da peça aderido na superfície de saída. Sem as texturas e com desgastes muito pequenos, a adesão de material não é favorecida com os pequenos tempos de usinagem usados em cada teste. Salienta-se que estas ferramentas foram as que apresentaram menores valores de força de usinagem.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Este item apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos ao longo do trabalho desenvolvido:

Ensaio de temperatura:

- As microtexturas podem ser utilizadas sim para a redução da temperatura na interface cavaco ferramenta.
- As maiores reduções de temperatura obtidas nos ensaios variando a rotação (velocidade de corte) e o avanço, tanto a seco como com MQL, foram para as ferramentas com microtexturas de orientação **Paralela** a aresta de corte.
- A redução média, quando comparada com a ferramenta lisa ficou, respectivamente para o ensaio variando a rotação (velocidade de corte) a seco e com MQL, em 7,5% e 6,9%. Para o ensaio variando o avanço os valores de redução média ficaram, respectivamente para seco e MQL, em 8,2% e 9,1%.
- A aplicação de microtexturas na superfície de saída da ferramenta de corte reduz a área de contato cavaco-ferramenta real, diminuindo a energia necessária para o cisalhamento do cavaco, que por sua vez reduz a temperatura de corte. As microtexturas também criam microcavidades, que atuam como reservatórios de lubrificantes, alterando diretamente as condições de contato cavaco-ferramenta, contribuindo, também, para a redução da temperatura.

Ensaio de força:

- Para os ensaios variando o avanço a ferramenta lisa apresentou os melhores resultados, possivelmente por gerar mais calor na interface ferramenta cavaco, o que facilita o processo de cisalhamento necessário para a formação do cavaco e, portanto, a usinagem. Neste caso os valores de força de usinagem (a seco) para as

microtexturas aumentaram, quando comparado a ferramenta lisa, de 8,1% para a microtextura paralela até 14,8% para a microtextura perpendicular. Quando um fluido de corte na forma de MQL foi aplicado, as forças de usinagem aumentaram de 8,9% (microtextura paralela) até 13,8% (microtextura em 45°).

- Nos ensaios variando a velocidade de corte o comportamento da força de usinagem acima de 180m/min apresentou uma maior eficiência para as ferramentas microtexturizadas do que para a ferramenta lisa. A possível presença de aresta postiça de corte - APC em velocidades mais baixas podem ser responsáveis por estes resultados.
- Na condição a seco, a redução variou de 6,5% (ferramenta com microtextura perpendicular) até 8,7% (ferramenta com microtextura em 45°). Na condição com MQL, a redução variou de 2,5% (ferramenta com microtextura perpendicular) até 5,8% (microtextura em "V").

Análise da superfície das ferramentas:

- Avaliando a integridade superficial das ferramentas após o ensaio, conclui-se que as ferramentas com microtextura paralelas à aresta principal de corte, tiveram em geral menos material da peça aderido na superfície de saída e menos quebras dos canais microtexturizados do que as demais ferramentas.
- As ferramentas que apresentaram as maiores quantidades de materiais aderidos e também danos na textura foram as com microtexturas em 45° com a aresta de corte. As ferramentas que apresentaram menor quantidade de material aderido e menos lascamentos na aresta foi a lisa.

5.2 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o efeito da microtexturização a laser em ferramentas de corte de outros materiais, como os metais duros revestidos, cerâmicas e ultraduras.

- Estudar o efeito da microtexturização a laser em ferramentas de corte, avaliando a vida da ferramenta.
- Estudar a adesividade do revestimento em ferramentas de corte de metal duro microtexturizadas a laser.
- Estudar o efeito da microtexturização a laser na superfície de folga de ferramentas de corte de metal duro, avaliando os parâmetros de força e de temperatura de usinagem.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALLMEN, M.V. **Laser-Beam Interactions with Materials: Physical Principles and Applications**. Springer Series Materials Science, v. 2, Berlin: Springer, 1987.

ARROYO, J. M. **Investigação Sobre o Uso da Texturização a Laser na Preparação da Superfície a ser Recoberta em Ferramentas de Metal Duro para Fresamento**. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 166 p. 2009.

ARULKIRUBAKARAN, D. et al. Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: An experimental and numerical approach. **Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Elsevier, v. 54, jan. 2016. 165-177 p.

ASTAKHOV, V.P. **Drills: Science and technology of advanced operations**. New York: CRC Press. 2014. 888 p.

BACKER, W. R. et al. The size effect in metal cutting. **Transaction of the ASME**, v. 74, Issue 1, 1952. 61-71 p.

BHUSHAN, B. Biomimetics: lessons from nature – an overview. **Philosophical transactions**, The Royal Society, v. 367, Issue 1893, abr., 2009. 1445-1486 p.

BUTTERY, T. C. ARCHARD, J. F. Grinding and abrasive wear. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Journal of Mechanical Engineering Science, v. 185, Issue 43, jun., 1971. 537-551 p.

CARSTEN, G. et al. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. **Wear**, Elsevier, v. 372-373, fev., 2017. 21-41 p.

COSTA H. L., Hutchings IM. **Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions**. Tribol Int 2007; 40: 1227–38.

DA SILVA, R.B., **Performance of Different Cutting Tool Materials in Finish Turning of Ti6Al4V with High Pressure Coolant Supply Technology**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC – UFU, Uberlândia – MG, 11 de agosto de 2006.

DIELS, J. C. **Ultrashort laser pulse phenomena**. 2nd Edition. New York: Academic Press, 2006. 680 p.

DINIZ, A.E. et al. Otimização das condições de usinagem em células. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Aranda Editora, n.281, jun., 1989. 48-54 p.

DOBRICA, M.B. et al. Optimizing surface texture for Hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, SAGE Publications, v. 224, Issue 8, jun., 2010. 737-750 p.

DUMITRU, G. LUSCHER, B. KRACK, M. Laser Processing of Hardmetals: Physical basics and applications. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Elsevier, v. 23, Issues 4-6, jul.- nov., 2005. 278-286 p.

ERBELE, G. et al. **Laser fabrication of diamond micro-cutting tool-related geometries using a high-numerical aperture micro-scanning system**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 81. 2015. 1117-1125 p.

ETSION, I. BURSTEIN, L. A model for mechanical seals with regular micro surface structure. **Tribology Transactions**, Taylor Francis Online, v. 39, Issue 3, mar., 2008. 677- 683 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. v. 1. São Paulo: Editora Blucher, 1970. 754 p.

FAVARETTO, V. A. **Influência do ângulo de saída da ferramenta de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta no torneamento de aço ABNT 1045**. Tese (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia universidade católica do Paraná. Curitiba, 1-10 p. 2017.

GAJRANI, K. K. et al. Environmental friendly hard machining performance of uncoated and MoS₂ coated mechanical micro-textured tungsten carbide cutting tools. **Tribology International**, Elsevier, v.125, set., 2018. 141-155 p.

GROPPER, D. et al. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. *Tribology International*, Elsevier, v. 94, feb., 2016. 509-529 p.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing engineering and technology**. 3. ed. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

KAWASEGI, N. et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. **Precision Engineering**, Elsevier, v. 33, Issue 3, jul. 2009. 248–254 p.

KOSHY, P. Tovey, J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 60, Issue 1, abr., 2011. 153–156 p.

KÜMMEL, J. et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 215, jan., 2015. 62–70 p.

LEI, S. DEVARAJAN, S. CHANG, Z. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 209, Issue 3, fev., 2009. 1612–1620 p.

LI, Y. et al. Surface textures on cemented carbide cutting tools by micro EDM assisted with high-frequency vibration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 82, Issue 9–12, fev., 2016. 2157–2165 p.

LIANG, W.L. et al. Micromachining of circular ring microstructure by femtosecond laser pulses. **Optics & Laser Technology**, Elsevier, v. 35, Issue 4, jun., 2003. 285-290 p.

MACHADO, A.R. **Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System**, PhD Thesis, University of Warwick, England, 1990.

MACHADO, A.R. and WALLBANK, J. **The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining**, *Wear*, vol. 210, N0. 1-2, 1997, pp 76 – 82.

MACHADO, A.R. and WALLBANK, J., **The Effects of a High Pressure Coolant Jet on Machining**. *Proceedings Part B1, Journal of Engineering Manufacture of The Institute of Mechanical Engineers*, vol 208, London England, 1994, pp 29-38.

MACHADO, Á.R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015. 407 p.

MACHADO, Á.R. SILVA, M.B. **Usinagem dos metais**. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia, 1999. 224 p.

MUMMERY, L. **Surface texture analysis: The handbook.** Hommelwerke GmbH, 1992.

NAKAYAMA, K. et al. Relationship between cutting forces, temperature, built up edge and surface finish, **Annals of CIRP**, v. 14, Issue 7, 1966. 211-223 p.

NOLTE, S. et al. Ablation of metals by ultrashort laser pulses. **Journal Optical Society of America B**, Optical Society of America, v. 14, Issue 10, out., 1997. 2716-2722 p.

OLIVEIRA, A. C. **Microssoldagem em Chapas Finas Utilizando um Laser de Cu-HBr.** Tese (Mestrado em Ciências) - Curso de Pós-Graduação em Física, na Área de Física Atômica e Molecular, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 112 p. 2006.

OLLEAK, A.; ÖZEL, T. 3D Finite element modeling based investigations of micro-textured tool designs in machining titanium alloy Ti- 6Al-4V. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 10, dez., 2017. 536-545 p.

READY, J.F. **LIA Handbook of Laser Materials Processing.** 1 ed. Orlando: Laser Institute of America and Magnolia Publishing, Inc., 2001. 263-297 p.

RECKTENWALD, G., “**Conversion of Thermocouple Voltage to Temperature**”, Apostila, Portland state University, Portland, USA, 2010, 23 pgs.

SEGU, D.Z. et al. The effect of multi-scale laser texturing surface on lubrication regime. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 270, abr., 2013. 58-63 p.

SAMAD, R. E. et al. Ultrashort laser pulses machining. In: Laser Pulses. **Theory, technology and applications**, Intech, oct., 2012.

SHAW, M. C. et al. Friction characteristics of sliding surfaces undergoing subsurface plastic flow. **Journal of Basic Engineering**, Transaction of the ASME, v. 82, jun., 1960. 342-346 p.

SHAW, M. C. et al., Machining titanium. **MIT Report**, U.S. Air Force, 1954.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles.** 3 ed. Massachusetts: MIT Press, 1968. 7.1-7.43 p.

SHQUCKRY, A. S. The effect of cutting conditions on dimensional accuracy, **Wear**, Elsevier, v. 80, Issue 2, ago., 1982. 197-205 p.

SHUM, P.W., ZHOU, Z.F.; LI, K.Y. Investigation of the tribological properties of the different textured DLC coatings under reciprocating lubricated conditions. **Tribology International**, Elsevier, v. 65, set., 2013. 259-264 p.

SOCOVIC, M., MIJANIVIC, K. Ecological Aspects of Cutting Fluids and Its Influence on Quantifiable Parameters of Cutting Process. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 109, Issues 1-2, fev., 2001.181-189 p.

TRENT, E. M. Cutting steel and iron with cemented carbide tools. Part II: conditions of seizure at the tool/work interface. **Journal of the Iron and Steel Institute**, Londres, nov., 1963. 923-932 p.

XIE, J. et al. Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 73, out., 2013. 25-36 p.

XING, Y. et al. Cutting performance and wear mechanism of nanoscale and microscale textured Al₂O₃/TiC ceramic tools in dry cutting of hardened steel. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Elsevier, v. 43, mar., 2014. 46-58 p.

YOUQIANG, X. et al. Effect of laser surface texturing on Si₃N₄/TiC ceramic sliding against steel under dry friction. **Materials and Design**, Elsevier, v. 52, dez., 2013. 234-245 p.

ZE, W. et al. Performance of the self-lubricating textured tools in dry cutting of Ti-6Al-4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.62, Issues 9-12, out., 2012. 943-951 p.

ZHANG, K. et al. Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-based TiAlN coated tools under different lubrication conditions. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 326, jan., 2015. 107-118 p.

ZOREV, N. N. **Interrelationship between shear process occurring along tool face and on shear plane in metal cutting**. **International Research in Production Engineering**. Pittsburg: Proceedings of the International Production Engineering Research Conference, 1963. 42-49 p.

WANG, X.C. et al. High Quality Femtosecond Laser Cutting of Alumina Substrates. Optics and Laser in Engineering, Vol. 48, 2010. 657-663 p.

Apêndice 1 - Resultados de temperatura

As tabelas A.1 e A.2 apresentam os resultados gerais de temperatura encontrados nos ensaios em que se variou a velocidade de corte, na condição à seco e com MQL, respectivamente, para as ferramentas com diferentes texturas.

Tabela A.1 – Resultados de temperatura [°C] para diferentes velocidades de corte na condição a seco; $f = 0,151$ mm/rot; $a_p = 1,0$ mm. Seco								
V_c [m/min]		12	45	76	120	192	239	Média
Lisa	Temp	335°C	482°C	610°C	729°C	816°C	882°C	642°C
	DP	26°C	6°C	10°C	14°C	13°C	15°C	14°C
Perpendicular	Temp	260°C	456°C	528°C	720°C	760°C	858°C	597°C
	DP	7°C	4°C	7°C	13°C	17°C	4°C	9°C
Paralela	Temp	240°C	455°C	538°C	711°C	773°C	849°C	594°C
	DP	3°C	2°C	4°C	10°C	19°C	17°C	9°C
45°	Temp	277°C	436°C	549°C	724°C	784°C	850°C	603°C
	DP	7°C	9°C	7°C	16°C	16°C	19°C	12°C
Chevrons	Temp	241°C	469°C	565°C	691°C	771°C	855°C	599°C
	DP	12°C	21°C	18°C	16°C	17°C	17°C	17°C

Tabela A.2 – Resultados de temperatura [°C] para diferentes velocidades de corte na condição MQL; $f = 0,151$ mm/rot; $a_p = 1,0$ mm. MQL								
V_c [m/min]		12	45	76	120	192	239	Média
Lisa	Temp	268°C	468°C	592°C	705°C	793°C	856°C	614°C
	DP	17°C	5°C	14°C	6°C	16°C	9°C	11°C
Perpendicular	Temp	256°C	451°C	523°C	686°C	730°C	839°C	581°C
	DP	18°C	8°C	10°C	16°C	13°C	8°C	12°C
Paralela	Temp	216°C	418°C	527°C	679°C	751°C	839°C	572°C
	DP	6°C	12°C	9°C	9°C	33°C	24°C	16°C
45°	Temp	261°C	422°C	525°C	697°C	756°C	843°C	584°C
	DP	7°C	5°C	19°C	18°C	20°C	20°C	15°C
Chevrons	Temp	230°C	449°C	562°C	674°C	714°C	847°C	579°C
	DP	9°C	18°C	13°C	14°C	18°C	22°C	16°C

As tabelas A.3 e A.4 apresentam os resultados gerais de temperatura encontrados nos ensaios em que se variou o avanço, na condição à seco e com MQL, respectivamente, para as ferramentas com diferentes texturas.

Tabela A.3 – Resultados de temperatura [°C] para diferentes avanços na condição a seco;

$v_c = 96 \text{ m/min}; a_p = 1,0 \text{ mmSeco}$					
Avanço [mm/rot]		0,062	0,151	0,327	Média
Lisa	Temp	559°C	672°C	766°C	665°C
	DP	19°C	20°C	27°C	22°C
Perpendicular	Temp	517°C	639°C	757°C	638°C
	DP	25°C	18°C	13°C	19°C
Paralela	Temp	508°C	635°C	689°C	611°C
	DP	9°C	13°C	28°C	17°C
45°	Temp	521°C	650°C	751°C	641°C
	DP	3°C	8°C	13°C	8°C
Chevrons	Temp	541°C	654°C	712°C	636°C
	DP	4°C	12°C	27°C	14°C

Tabela A.4 – Resultados de temperatura [°C] para diferentes avanços na condição MQL;

$v_c = 96 \text{ m/min}; a_p = 1,0 \text{ mmMQL}$					
Avanço [mm/rot]		0,062	0,151	0,327	Média
Lisa	Temp	544°C	662°C	758°C	655°C
	DP	33°C	22°C	20°C	25°C
Perpendicular	Temp	489°C	622°C	749°C	620°C
	DP	11°C	17°C	16°C	15°C
Paralela	Temp	495°C	620°C	672°C	596°C
	DP	9°C	18°C	25°C	17°C
45°	Temp	512°C	602°C	715°C	610°C
	DP	4°C	9°C	13°C	9°C
Chevrons	Temp	515°C	617°C	687°C	606°C
	DP	7°C	14°C	25°C	15°C

Apêndice 2 - Resultados de Força de usinagem

As tabelas A.5 e A.6 apresentam os resultados gerais de força de usinagem encontrados nos ensaios em que se variou a velocidade de corte, a seco e com MQL, respectivamente, para as ferramentas com diferentes texturas.

Tabela A.5 – Resultados de força de usinagem [N] para diferentes velocidades de corte na condição a seco; f = 0,151 mm/rot; a _p = 1,0 mm. Seco									
V _c (m/min)		30	60	120	180	240	300	360	Média
Lisa	Fu [N]	415	468	526	471	463	457	448	464
	DP [N]	34	22	13	9	11	46	8	20
Perpendicular	Fu [N]	427	440	462	452	432	418	418	435
	DP [N]	16	22	14	10	13	15	15	15
Paralela	Fu [N]	462	508	476	440	420	418	414	448
	DP [N]	11	26	20	10	11	15	15	15
45°	Fu [N]	461	466	484	450	422	406	400	441
	DP [N]	16	26	13	13	14	15	17	16
Chevrons	Fu [N]	436	462	498	463	423	406	414	443
	DP [N]	15	24	15	12	13	16	16	16

Tabela A.6 – Resultados de força de usinagem [N] para diferentes velocidades de corte na condição MQL; f = 0,151 mm/rot; a _p = 1 mm. MQL									
V _c (m/min)		30	60	120	180	240	300	360	Média
Lisa	Fu [N]	410	431	419	408	420	437	456	426
	DP [N]	19	20	8	9	10	10	11	12
Perpendicular	Fu [N]	436	439	416	422	422	418	416	424
	DP [N]	21	27	12	11	14	16	20	17
Paralela	Fu [N]	457	491	445	421	415	403	392	432
	DP [N]	21	14	8	11	13	12	13	13
45°	Fu [N]	453	504	456	431	409	401	403	437
	DP [N]	21	18	11	13	14	13	14	15
Chevrons	Fu [N]	410	444	458	422	408	396	395	419
	DP [N]	15	23	18	10	11	13	11	15

As Tabelas A.7 e A.8 apresentam os resultados gerais de força de usinagem encontrados nos ensaios em que se variou o avanço, a seco e com MQL, respectivamente, para as ferramentas com diferentes texturas.

Tabela A.7 – Resultados de força de usinagem [N] para diferentes avanços na condição a seco;
 $v_c = 96 \text{ m/min}$; $a_p = 1,0 \text{ mm}$

Seco									
Avanço [mm/rot]		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	Média
Lisa	Fu [N]	162	279	383	496	617	729	835	500
	DP [N]	8	7	11	10	11	15	18	11
Perpendicular	Fu [N]	190	309	455	551	708	842	965	574
	DP [N]	14	16	17	11	21	20	21	17
Paralela	Fu [N]	193	313	446	545	671	770	847	541
	DP [N]	14	17	13	11	19	26	37	20
45°	Fu [N]	203	325	467	590	703	774	871	562
	DP [N]	16	20	17	18	23	43	52	27
Chevrons	Fu [N]	196	328	478	571	682	809	932	571
	DP [N]	15	19	15	11	15	17	22	16

Tabela A.8 – Resultados de força de usinagem [N] para diferentes avanços na condição MQL;

$v_c = 96 \text{ m/min}$; $a_p = 1,0 \text{ mmMQL}$									
Avanço [mm/rot]		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	Média
Lisa	Fu [N]	156	280	382	482	579	695	787	480
	DP [N]	12	8	9	8	14	13	22	12
Perpendicular	Fu [N]	162	288	404	515	633	775	913	527
	DP [N]	11	10	10	11	15	15	17	13
Paralela	Fu [N]	178	300	447	545	648	730	811	523
	DP [N]	14	14	13	15	20	33	34	20
45°	Fu [N]	201	319	453	556	666	759	871	547
	DP [N]	14	14	13	13	13	42	25	19
Chevrons	Fu [N]	174	304	440	554	649	750	832	529
	DP [N]	14	15	14	13	22	27	32	19