



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

FERNANDO SABINO FONTEQUE RIBEIRO

EFEITO DA POSIÇÃO E DIMENSÕES DE UMA MICRORRANHURA
PRODUZIDA NA SUPERFÍCIE DE SAÍDA DA FERRAMENTA DE CORTE
SOBRE OS MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO

BAURU

2024

FERNANDO SABINO FONTEQUE RIBEIRO

**EFEITO DA POSIÇÃO E DIMENSÕES DE UMA MICRORRANHURA PRODUZIDA
NA SUPERFÍCIE DE SAÍDA DA FERRAMENTA DE CORTE SOBRE OS
MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",
como requisito à obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador:
Professor Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez.

BAURU

2024

Ribeiro, Fernando Sabino Fontequê.

Efeito da posição e dimensões de uma microrranhura produzida na superfície de saída da ferramenta de corte sobre os mecanismos de formação do cavaco / Fernando Sabino Fontequê Ribeiro. - Bauru, 2024

214 f. : il.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista (UNESP). Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Luiz Eduardo de Angelo Sanchez

1.Ferramenta de corte restrito. 2. Microrranhura. 3.Formação de cavaco. 4. Corte derivativo. 5. Zona de aderência. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE FERNANDO SABINO FONTEQUE RIBEIRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de julho do ano de 2024, às 08:30 horas, no(a) ANFITEATRO DA PÓS-GRADUAÇÃO, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de FERNANDO SABINO FONTEQUE RIBEIRO, intitulada **EFEITO DA POSIÇÃO E DIMENSÕES DE UMA MICRORANHURA PRODUZIDA NA SUPERFÍCIE DE SAÍDA DA FERRAMENTA DE CORTE SOBRE OS MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE CAVACO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia - Unesp/Câmpus de Bauru, Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. ALEXANDRE MENDES ABRAO (Participação Presencial) do(a) DEPTO. DE ENGENHARIA MECANICA / UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ



A minha esposa Larissa, minha filha Lúgia e todos da minha família e amigos, dedico este trabalho. Agradeço a Deus por colocar pessoas especiais em meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, nosso criador, por me conceder o dom da vida e me capacitar para toda e qualquer adversidade.

Agradeço a minha esposa Larissa e minha filha Lígia por serem a razão da minha vida e estarem presentes nos momentos de alegria e tristeza aos quais temos passados nestes últimos anos.

Agradeço a todos meus familiares por terem me tornado uma pessoa de bem.

Agradeço ao Instituto Federal do Paraná, campus Jacarezinho pelos laboratórios e recursos disponibilizados para a execução deste trabalho. Agradeço em especial os professores Ricardo Breganon e André Moscato, por me incentivarem desde o início do mestrado e até agora, me mostrando que estas etapas eram possíveis. Agradeço ao professor Felipe Possoli e Murillo Gentil pelos auxílios realizados e pela amizade. Agradeço a todos os professores e técnicos do campus Jacarezinho pelo companheirismo e amizade.

Agradeço ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNESP Bauru por me propiciar as condições para a realização do meu trabalho, em especial ao meu orientador, Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, pela confiança em mim depositada. Agradeço ao meu amigo, professor José Cláudio Lopes, sem o qual eu não teria condições de ter realizado o mestrado e tão pouco o doutorado. Agradeço a todos os professores, técnicos e amigos que fiz nos últimos anos na UNESP. Juntamente, agradeço a CAPES, pelo apoio financeiro junto ao grupo de pesquisa.

Agradeço a todos os amigos e familiares que nos deixaram nestes últimos anos. Meu avô Airton Fontequê, minha avó Dulce Ribeiro, meu sogro Lourival Martins, meu amigo Claiton Luizete e meu professor e amigo Emerson Gonçalves, obrigado pelas experiências de vida e que Deus os tenha. Por fim, agradeço e dedico este trabalho a minha querida mãe, Maria Cecília Fontequê Ribeiro, que no dia 23 de junho de 2024 foi recebida por Deus. Saudades ficam, mas as boas lembranças e seu amor me confortam.

“Olhe para o céu e diga: Santíssimo senhor Jesus, envia vosso Santo Espírito, ilumina nossos caminhos, nos de força e coragem, saúde do corpo e da alma, inteligência resignação e determinação, paciência, saúde, paz, muito amor e caridade...Amém”

Airton Fontequê

RESUMO

Uma das importantes premissas no desenvolvimento da geometria das ferramentas de corte reside na minimização do contato cavaco/ferramenta a fim de mitigar as forças envolvidas na formação do cavaco e, assim, melhorar o desempenho da operação. Esta tendência se firmou em meados do século passado quando os maiores pesquisadores em usinagem daquela época lançaram mão das chamadas ferramentas de contato restrito, cujo valor da área de contato cavaco/ferramenta pode ser controladamente imposto, e então o efeito da área na força de usinagem avaliado. Na mesma época se deu o estudo dos quebra-cavacos em busca do compromisso satisfatório entre a forma desejada do cavaco e o inevitável acréscimo na força de usinagem. Como consequência do conhecimento acumulado vieram as ferramentas com ranhura, posicionada contígua à aresta de corte, que incorporaram as geometrias do corte restrito e dos quebra-cavacos se aproximando das ferramentas modernas. Após um intervalo relativamente grande, no início dos anos 2000, surgiram as primeiras ferramentas de corte estruturadas, também denominadas texturizadas. Essencialmente, se trata de ferramentas de corte em cuja superfície de saída e/ou de flanco é confeccionada uma estrutura geométrica em relevo, normalmente com padrão determinístico, em escala micrométrica ou nanométrica. Como princípio, busca-se, assim como nos estudos antecessores das ferramentas de corte, a minimização da área de contato e seus consequentes benefícios. No entanto, o corte derivativo, surgido pelo contato da superfície inferior do cavaco com uma aresta da estrutura/textura, produz efeito adverso ao ponto de inviabilizar o seu emprego. Ademais, o grande número de parâmetros envolvido na definição de uma superfície estruturada/texturizada e sua influência sobre a formação do cavaco ainda não conta com subsídios suficientes na literatura para sua total compreensão. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo central o estudo da influência dos principais parâmetros definidores de uma estrutura/textura, representado por uma única microrranhura, sobre as características da formação do cavaco e sua interação com a ferramenta com vista à intensidade do corte derivativo. Para isso, são avaliados o grau de recalque, a força de usinagem, observações da microestrutura do cavaco, obtidas com auxílio de um dispositivo “quick-stop” desenvolvido como parte deste trabalho, e filmagens da interação entre cavaco e ferramenta. A operação escolhida foi o corte ortogonal do cobre (eletrolítico) usando ferramentas de aço rápido, em cuja superfície de saída de cada uma delas foi confeccionada uma microrranhura com diferentes dimensões e posições em relação à aresta de corte. Em adição, sob as mesmas condições, foram conduzidos testes com ferramentas de contato restrito, uma vez que os dois tipos de ferramentas são direcionados à minimização da área de contato cavaco/ferramenta. De maneira geral, além das imagens inéditas da interação entre cavaco e microrranhura, observou-se que: o ângulo da direção do cavaco formado na ferramenta de corte restrito guarda relação com a posição e dimensões da microrranhura determinando a severidade do corte derivativo; uma combinação incorreta entre espessura de corte e posição da microrranhura gera outra região de aderência, adicional, com aumento do comprimento de contato cavaco/ferramenta; o melhor resultado alcançado nas condições do trabalho referem-se a uma microrranhura de 0,35 mm de largura com uma razão entre posição da microrranhura e espessura de Corte entre 2,5 e 5,5.

Palavras-chave: ferramenta de contato restrito, micro-ranhura, formação de cavaco, corte derivativo, zona de aderência.

ABSTRACT

One of the important premises in the development of cutting tool geometry lies in minimizing chip/tool contact in order to mitigate the forces involved in chip formation and, thus, improve operation performance. This trend was established in the middle of the last century when the greatest researchers in machining at that time made use of so-called restricted contact tools, whose value of the chip/tool contact area can be controlled and imposed, and then the effect of the area on the machining force evaluated. At the same time, chipbreakers were studied in search of a satisfactory compromise between the desired chip shape and the inevitable increase in machining force. As a consequence of the accumulated knowledge came tools with a groove, positioned adjacent to the cutting edge, which incorporated the geometries of restricted cutting and chip breakers, approaching modern tools. After a relatively long interval, in the early 2000s, the first structured cutting tools, also called textured, appeared. Essentially, these are cutting tools whose rake and/or flank face contains a geometric relief structure, normally with a deterministic pattern, on a micrometric or nanometric scale. As a principle, as in previous studies of cutting tools, the aim is to minimize the contact area and its consequent benefits. However, the derivative cut, arising from the contact of the lower surface of the chip with an edge of the structure/texture, produces an adverse effect to the point of making its use unfeasible. Furthermore, the large number of parameters involved in defining a structured/textured surface and their influence on chip formation still does not have sufficient support in the literature for its full understanding. In this context, this work's central objective is to study the influence of the main defining parameters of a structure/texture, represented by a single microgroove, on the characteristics of chip formation and its interaction with the tool with a view to the intensity of the derivative cutting. To this end, the chip ratio, machining force, observations of the microstructure of the chip, obtained with the aid of a “quick-stop” device developed as part of this work, and footage of the interaction between chip and tool are evaluated. The operation chosen was the orthogonal cutting of copper (electrolytic) using high-speed steel tools, on the rake face of each of which a microgroove was created with different dimensions and positions in relation to the cutting edge. In addition, under the same conditions, tests were conducted with restricted contact tools, since both types of tools are aimed at minimizing the chip/tool contact area. In general, in addition to the unprecedented images of the interaction between chip and microgroove, it was observed that: the angle of the chip direction formed in the restricted cutting tool is related to the position and dimensions of the microgroove, determining the severity of the derivative cut; an incorrect combination between cutting depth and microgroove position generates another additional adhesion region, with an increase in the chip/tool contact length; The best results achieved under working conditions refer to a 0.35 mm wide microgroove with a ratio between microgroove position and cutting depth between 2.5 and 5.5.

Keywords: restricted contact tool, microgroove, chip formation, derivative cutting, sticking zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ferramenta de contato restrito. Adaptado de Takeyama e Usui (1958).....	34
Figura 2: Força em função da profundidade corte para diferentes l/t_1 . Adaptado de Wallace e Boothroyd (1964) e Hsu (1966).	35
Figura 3: Gradiente de força no contato normal e restrito. Adaptado de Lo et al. (1966)	36
Figura 4: Força em função da espessura indeformada de cavaco para diferentes comprimentos de contato restrito. Adaptado de Lo et al. (1966).	37
Figura 5: Usinagem quando (a) $t_1/l < 0,6$ e (b) $t_1/l > 0,6$. Adaptado de Lo et al. (1966).....	38
Figura 6: Grau de recalque em função da razão t_1/l . Adaptado de Lo et al. (1966).	38
Figura 7: Cavaco formado no (a) contato natural e (b) restrito. Adaptado de Usui e Shaw (1962).	39
Figura 8: Graus de recalque em diferentes trabalhos encontrados na literatura.	41
Figura 9: Ferramenta com ranhura para controle de cavaco. Adaptado de Shi et al. (1993). ..	44
Figura 10: Grau de recalque, força de corte e raio de curvatura do cavaco em função de l/t_1 . Adaptado de Shi et al. (1993).	45
Figura 11: Grau de recalque, força de corte e raio de curvatura do cavaco em função de G/t_1 . Adaptado de Shi et al. (1993).	46
Figura 12: Representação: (a) posição e medidas da microrranhura, (b) marcas do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta convencional. Adaptado de Sugihara et al. (2021). ..	53
Figura 13: Posição das zonas de contato em função da espessura de cortena ferramenta convencional. Adaptado de Sugihara et al. (2021).	53
Figura 14: Razões η_F e η_N em função da espessura de corte . Adaptado de Sugihara et al. (2021).	54

Figura 15: Representação do corte derivativo pela aresta da microrranhura. Adaptado de Sugihara et al. (2021).....	55
Figura 16: Representação da espessura indeformada mínima do cavaco derivativo (t_{dm}) (adaptado de Son et al. 2005 e Duan et al., 2018a).	58
Figura 17: Predição de cavaco derivativo ou “ploughing” para diferentes distâncias da microrranhura à aresta de corte (l_1) (Adaptado de Duan et al., 2018a).	60
Figura 18: Microrranhuras à diferentes distâncias da aresta de corte e seus cavacos: (a) 250 μm ; (b) 300 μm ; e (c) 350 μm	61
Figura 19: Espessura indeformada do cavaco derivativo (t_d) e espessura mínima (t_{dm}) em funções da largura (l_2) e raio da aresta (r_d) sob diferentes velocidades de corte.	62
Figura 20: Fluxograma do cálculo para predição da força de usinagem (Duan et al., 2018b).	63
Figura 21: Simulações das forças de usinagem e derivativa sob diferentes velocidades e raios da aresta da microrranhura (Adaptado de Duan et. al, 2018b).	65
Figura 22: (a) Usinagem com ferramenta com microrranhuras; (b) visão ampliada do comprimento de contato; e (c) interface cavaco-ferramenta. Adaptado de Siju et al. (2021).	70
Figura 23: Tensões normais e de cisalhamento na face da ferramenta. Shaw (2005).	72
Figura 24: Regiões de aderência e deslizamento. Adaptado de Doyle et al. (1979).	73
Figura 25: Regiões de contato entre ferramenta de aço rápido e cobre. (a) e (b) 3 m/min; (c) e (d) 120 m/min. Adaptado de Wright (1981)	75
Figura 26: Ferramentas de aço rápido na usinagem de cobre (0,42 m/min). a) ferramenta polida; b) ferramenta sem polimento. Adaptado de Wright (1981).	75
Figura 27: Análise de <i>quick-stop</i> para a usinagem de cobre. Adaptado de Wright (1981).	76
Figura 28: <i>Setups</i> de fixação do corpo de prova para (a) filmagem e (b) medição de forças.	79
Figura 29: Deformação excessiva do material do corpo de prova.	80

Figura 30: Superfície de saída recoberta com (a) tinta de marcador permanente, (b) tinta de marcação de peças - azul da Prússia (b) e (c) <i>primer</i> para pintura.	81
Figura 31: Ferramenta com superfície de saída (a) retificada, (b) oxidada e (c) diferença visual entre não oxidada e oxidada.	82
Figura 32: Parâmetros geométricos das ferramentas de corte (a) de contato restrito e (b) com microrranhura (b).	84
Figura 33: Ferramentas de contato restrito usadas no trabalho com comprimento da superfície de saída de (a) 0,25, (b) 0,50, (c) 0,75, (d) 1,00, (e) 1,25, (f) 1,50 mm.	85
Figura 34: Ferramentas de corte com microrranhuras de diferentes designações: (a) LG0.25, (b) LG0.50, (c) LG0.75, (d) SG0.25, (e) SG0.50 e (f) SG0.75.	86
Figura 35: <i>Setup</i> para fabricação das ferramentas de corte.	87
Figura 36: Ferramentas de corte prontas após a operação de eletroerosão.	88
Figura 37: Montagem experimental para filmagem de corte ortogonal.	89
Figura 38: <i>Setup</i> para aquisição de forças.	90
Figura 39: Desenvolvimento inicial do QSD em sua (a) posição de retração, (b) posição de avanço e (c) configuração final.	91
Figura 40: Representação do conjunto móvel do QSD.	92
Figura 41: Componentes e funcionamento do gatilho.	92
Figura 42: QSD final em (a) posição de corte (vista frontal), (b) mecanismo de gatilho em posição de corte (vista traseira), (c) posição de retração (vista frontal) e (d) mecanismos de gatilho acionado (vista traseira).	93
Figura 43: Teste de bancada para mediação das condições de retração da ferramenta de corte no <i>quick-stop</i>	94
Figura 44: Parâmetros geométricos para determinação da força da mola no QSD.	96
Figura 45: Montagem final do QSD.	97

Figura 46: Testes do QSD: (a) aço SAE 1045 e (b) tubo de aço SAE 1020.	97
Figura 47: Micrografia do cavaco em aço SAE 1020 obtida por meio de dispositivo <i>quick-stop</i> sob velocidade de corte de 100 m/min.	98
Figura 48: Aplicação do QSD no tubo de cobre.....	99
Figura 49: Região de contato do cavaco com ferramenta convencional em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	103
Figura 50: Regiões de aderência e deslizamento para ferramenta convencional ($t_1 = 0,15$ mm)	104
Figura 51: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura LG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	105
Figura 52: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura LG0.25.	106
Figura 53: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura LG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	107
Figura 54: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura LG0.50.....	107
Figura 55: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura LG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	109
Figura 56: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura LG0.75.....	109
Figura 57: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura SG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	111

Figura 58: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura SG0.25.	111
Figura 59: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura SG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	112
Figura 60: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura SG0.50.	113
Figura 61: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura SG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	114
Figura 62: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura SG0.75.	114
Figura 63: Relação entre (a) comprimento total natural e (b) comprimento total com microrranhuras. Adaptado de Sharma e Pandey (2016).	115
Figura 64: Comprimentos de contato nas ferramentas de contato restrito em função da espessura de corte	118
Figura 65: Relação (t_1/l) em diferentes ferramentas de contato restrito e na ferramenta convencional em função da espessura de corte	118
Figura 66: Relação (t_1/l) para as ferramentas com microrranhura e ferramenta convencional.	120
Figura 67: Razão de contato (r_{ct}) para ferramentas de contato restrito.	121
Figura 68: Razão de contato (r_{ct}) para as ferramentas LG0.25, SG0.25 e RC0.25.	122
Figura 69: Razão de contato (r_{ct}) para as ferramentas LG0.50, SG0.50 e RC0.50.	122
Figura 70: Razão de contato (r_{ct}) para as ferramentas LG0.75, SG0.75 e RC0.75.	123

Figura 71: Microscopia da parte inferior do cavaco formado com ferramenta convencional, para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	125
Figura 72: MEV da parte inferior do cavaco formado em ferramenta convencional para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	126
Figura 73: Imagem em MEV do cavaco formado em ferramenta de corte convencional com espessura de corte de 0,10 mm.	127
Figura 74: Microscopia da parte inferior do cavaco formado com ferramenta LG0.25 para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	128
Figura 75: Corte derivativo na (a) ferramenta de corte LG0.25 ($t_1 = 0,30$ mm) com microrranhura preenchida e (b) cavaco aderido na superfície de saída da ferramenta.	128
Figura 76: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,20 mm; (d) 0,25 mm; (e) 0,30 mm; e (f) 0,40 mm.	130
Figura 77: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	131
Figura 78: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.	132
Figura 79: MEV da parte inferior do cavaco formado em ferramenta LG0.50 para as profundidades de corte: (a) 0,10 mm; (b) 0,15 mm.	133
Figura 80: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	134

Figura 81: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	135
Figura 82: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.25, variando a espessura de corte : a)0,10 mm; b)0,15 mm; c)0,20 mm; d)0,30 mm; e)0,40 mm.	136
Figura 83: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	137
Figura 84: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,10 mm; (b) 0,15 mm; (c) 0,20 mm; (d) 0,3 0mm; e (e) 0,40 mm.	137
Figura 85: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g)0,35 mm; e (h) 0,40mm.	138
Figura 86: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.75 para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,15 mm; (c) 0,20 mm; (d) 0,25 mm; (e) 0,30 mm; (f) 0,35 mm; e (g) 0,40 mm.	139
Figura 87: (a) Área de aderência após corte derivativo e (b) sem região de aderência após corte derivativo.	140
Figura 88: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	142
Figura 89: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	143
Figura 90: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	144

Figura 91: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC1.00 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	145
Figura 92: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC1.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h)0,40 mm.	145
Figura 93: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC1.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h)0,40 mm.	146
Figura 94: Superfície inferior dos cavacos obtidos com a espessura de cortede 0,10 mm e aumento progressivo da superfície de contato restrito de 0,25 até 1,5 mm.....	147
Figura 95: Corte ortogonal com a ferramenta convencional em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm;(f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	148
Figura 96: Grau de recalque obtido com ferramenta de corte convencional.....	149
Figura 97: Imagem em QSD para a condição convencional (0,2 mm/rev).	149
Figura 98: Grau de recalque dos cavacos formados com ferramentas de contato restrito em função da espessura de corte	150
Figura 99: Grau de recalque dos cavacos formados com ferramentas de contato restrito em função da relação t_1/l	151
Figura 100: Corte ortogonal com a ferramenta RC0.25 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	151
Figura 101: Imagem em QSD para a condição RC0.25 (0,2 mm/rev).	152
Figura 102: Imagem em QSD para a condição RC0.25 (0,2 mm/rev) com determinação da região de contato.....	152

Figura 103: Corte ortogonal com a ferramenta RC0.50 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	153
Figura 104: Corte ortogonal com a ferramenta RC0.75 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	154
Figura 105: Imagem em QSD para a condição RC0.50 (0,2 mm/rev).	154
Figura 106: Imagem em QSD para a condição RC0.75 (0,2 mm/rev).	155
Figura 107: Corte ortogonal com a ferramenta RC1.00 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	156
Figura 108: Corte ortogonal com a ferramenta RC1.25 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	156
Figura 109: Corte ortogonal com a ferramenta RC1.50 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	157
Figura 110: Imagem em QSD para a condição RC1.00 (0,2 mm/rev).	158
Figura 111: Imagem em QSD para a condição RC1.25 (0,2 mm/rev).	159
Figura 112: Imagem em QSD para a condição RC1.50 (0,2 mm/rev).	159
Figura 113: Ângulo de trajetória do cavaco em ferramentas de contato restrito.....	160
Figura 114: Corte ortogonal com a ferramenta LG0.25 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	161

Figura 115: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.50 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	162
Figura 116: Corte ortogonal com a ferramenta LG0.75 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	162
Figura 117: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.25 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	163
Figura 118: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.50 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	164
Figura 119: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.75 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm;(b) 0,10 mm;(c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.	164
Figura 120: Comparação entre (a) corte derivativo e (b) corte derivativo induzido.	165
Figura 121: Corte derivativo na ferramenta LG0.25 ($t_1 = 0,10$ mm)	166
Figura 122: Corte derivativo com deformação inicial na ferramenta LG0.25 ($t_1 = 0,15$ mm)	166
Figura 123: Corte derivativo com deformação inicial na ferramenta SG0.25 ($t_1 = 0,10$ mm)	167
Figura 124: Corte derivativo com deformação inicial na ferramenta SG0.25 ($t_1 = 0,15$ mm)	168
Figura 125: Perfis da ferramenta de contato restrito (RC0.25) com imagem virtual sobreposta da ferramenta com microrranhura (a) LG0.25 e (b) SG0.25.	169
Figura 126: Representação da espessura mínima de cavaco indeformado do corte derivativo (t_{dm}).....	171

Figura 127: Representação do valor crescente da espessura indeformada do cavaco (t_d) em função do ângulo de trajetória (η).	172
Figura 128: Representação da posição da microrranhura ou do início da restrição de contato (l_1).	175
Figura 129: Micrografias dos cavacos em QSD: (a) ferramenta LG0.25; (b) detalhe do cavaco secundário; (c) ferramenta SG0.25; (d) ferramenta RC0.25; e (e) ferramenta convencional.	176
Figura 130: Grau de recalque (R_c) dos cavacos formados em ferramentas LG0.25, SG0.25 e RC0.25 e ferramenta convencional.	177
Figura 131: Grau de recalque (R_c) dos cavacos formados em ferramentas LG0.50, SG0.50 e RC0.50 e ferramenta convencional.	178
Figura 132: Micrografias dos cavacos em QSD: (a) ferramenta LG0.50; (b) detalhe do cavaco secundário; (c) ferramenta SG0.50; (d) ferramenta RC0.50.	178
Figura 133: Grau de recalque (R_c) dos cavacos formados em ferramentas LG0.75, SG0.75 e RC0.75 e ferramenta convencional.	179
Figura 134: Grau de recalque (R_c) dos cavacos formados em ferramentas LG1.00, SG1.00 e RC1.00 e ferramenta convencional.	180
Figura 135: Micrografias dos cavacos na (a) ferramenta LG0.75; (b) SG0.75; e (c) RC0.75.	180
Figura 136: Força resultante obtidas com ferramentas de contato restrito.....	181
Figura 137: Força de corte normal à superfície de saída obtidas com ferramentas de contato restrito.....	182
Figura 138: Força de corte tangencial à superfície de saída obtidas com ferramentas de contato restrito.	182
Figura 139: Força normal e tangencial em função do aumento do comprimento de contato, com espessura de corte de 0,05 mm.	183

Figura 140: Força normal em função da espessura de corte em ferramentas de contato restrito.	184
Figura 141: Força tangencial em função da espessura de corte em ferramentas de contato restrito.	184
Figura 142: Coeficiente de atrito na usinagem com ferramentas de contato restrito	187
Figura 143: Força resultante obtida com as ferramentas de corte LG0.25, SG0.25, RC0.25 e convencional.	188
Figura 144: Forças de corte resultantes obtidas com as ferramentas de corte LG0.50, SG0.50, RC0.50 e convencional.	189
Figura 145: Força resultante obtida com ferramentas de corte LG0.75, SG0.75, RC0.75 e convencional.	190
Figura 146: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,05 mm de espessura de corte	191
Figura 147: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,10 mm de espessura de corte	192
Figura 148: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,15 mm de espessura de corte	193
Figura 149: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,20 mm de espessura de corte	194
Figura 150: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,25 mm de espessura de corte	195
Figura 151: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,30 mm de espessura de corte	197
Figura 152: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,35 mm de espessura de corte	198

Figura 153: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura à 0,40 mm de espessura de corte 199

Figura 154: Relação de contato cavaco e ferramenta com a presença de corte derivativo. ...202

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições empregadas nos trabalhos da Figura 8.....	41
Tabela 2: Força de corte em função de l/t_1	46
Tabela 3: Tipos de textura/estrutura encontrados na literatura. Adaptado de Ribeiro (2019)..	48
Tabela 4: Características da pior e melhor microrranhura	56
Tabela 5: Espessura indeformada de cavaco e seu respectivo comprimento de contato.....	83
Tabela 6: Ferramentas de corte empregadas nos ensaios.	86
Tabela 7: Parâmetros sugeridos pelo fabricante da máquina para eletroerosão do par aço-cobre.	87
Tabela 8: Relação entre posição da microrranhura e espessura de corte(l_1/t_1) calculado de Sugihara et al. (2021).....	116
Tabela 9: Relação (l_1/t_1) neste trabalho.	116
Tabela 10: Ângulo de trajetória (η) para ferramentas de contato restrito, em graus.....	160
Tabela 11: Ocorrência de corte derivativo comum e corte derivativo induzido para várias condições.	169
Tabela 12: Ângulo de atrito β para todas as condições avaliadas ($^\circ$)	170
Tabela 13: Ângulo de contato θ para ferramentas de corte com microrranhura ($^\circ$).....	171
Tabela 14: Espessura indeformada mínima do cavaco derivativo - t_{dm} (μm)	171
Tabela 15: Espessura indeformada do cavaco derivativo - t_d (μm).....	173
Tabela 16: Relação da posição da microrranhura (l_1), ou início da restrição do contato, em relação a espessura de corte(t_1), (l_1/t_1).	174
Tabela 17: Força resultante, relação (t_1/l) e (l/t_1), razão de contato e coeficiente de atrito obtidas com as ferramentas de contato restrito.....	185

Tabela 18: Dados relativos à espessura de cortede 0,05 mm.	192
Tabela 19: Dados relativos à espessura de cortede 0,10 mm.	193
Tabela 20: Dados relativos à espessura de cortede 0,15 mm.	194
Tabela 21: Dados relativos à espessura de cortede 0,20 mm.	195
Tabela 22: Dados relativos à espessura de cortede 0,25 mm.	196
Tabela 23: Dados relativos à espessura de cortede 0,30 mm.	197
Tabela 24: Dados relativos à espessura de cortede 0,35 mm.	199
Tabela 25: Dados relativos à espessura de cortede 0,40 mm.	200

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Ponto de estagnação
BSED	<i>Backscattered Electrons Detector</i>
d	Profundidade necessária para restrição do contato
dg	Profundidade da microrranhura
ETD	<i>Everhart-Thornley Detector</i>
EDS	<i>Espectroscopia de energia dispersiva</i>
f_{cr}	Avanço crítico
Fc	Força de corte
Fd	Força derivativa
Fd _N	Força derivativa no sentido normal
Fd _T	Força derivativa no sentido tangencial
Ff	Força de avanço
F _{Tt}	Força tangencial em ferramenta texturizada
F _{Nt}	Força normal em ferramenta texturizada
F _{Tc}	Força tangencial em ferramenta convencional
F _{Nc}	Força normal em ferramenta convencional
G	Dimensão da ranhura
HSS	Aço rápido
I _{zz}	Momento de inércia no eixo z
K _T	Gradiente da força tangencial
K _N	Gradiente da força normal
l ₁	Distância da primeira ranhura para a aresta de corte
l ₂	Largura da microrranhura
l ₃	Distância entre microrranhuras
l	Comprimento de contato restrito
l _{ef}	Comprimento de contato efetivo
l _t	Comprimento de contato total
l _n	Comprimento de contato natural
l/ t ₁	Razão do comprimento de contato
l ₁ /t ₁	Relação entre posição da microrranhura e espessura de corte

LG	Microrranhura larga
M	Momento torsor
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
n	Fator de comprimento de contato
n_r	Número de ranhuras
Nd/YAG	<i>Neodymium-doped yttrium aluminium garnet</i>
QSD	Dispositivo quick-stop
Ra	Rugosidade média aritmética
r	Raio da aresta
r_{ct}	Razão de contato
RCT	Ferramenta de contato restrito
Rc	Grau de recalque
RC	Contato restrito
SAE	<i>Society of automotive Engineers</i>
SG	Microrranhura estreita
t_{dm}	Espessura indeformada mínima do cavaco derivativo
t_d	Espessura indeformada do cavaco
t_1	Espessura de corte
t_2	Espessura do cavaco deformado
t_1/l	Razão entre espessura de corte e comprimento de contato
$(t_1/l)_{cr}$	Razão do comprimento de contato crítica
V	Diferença de potencial / Velocidade tangencial
V_x	Velocidade do cavaco na direção x
V_y	Velocidade do cavaco na direção y
V_c	Velocidade de corte
W	Altura do obstáculo
α	Aceleração angular
β	Ângulo de atrito
γ	Ângulo de saída
η	Ângulo de trajetória
η_F	Razão de força tangencial
η_N	Razão de força normal

θ	Ângulo de estagnação / Variação angular
ω	Velocidade angular
ω_0	Velocidade angular inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	FERRAMENTAS DE CONTATO RESTRITO	33
2.2	FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS E ESTRUTURADAS	47
2.3	ÁREA DE CONTATO ENTRE CAVACO E FERRAMENTA	69
3	MATERIAIS E MÉTODOS	78
3.1	FERRAMENTA, CORPO DE PROVA E MÁQUINA FERRAMENTA	78
3.2	DEFINIÇÃO E FABRICAÇÃO DA FERRAMENTAS COM MICRORRANHURA E FERRAMENTA DE CONTATO RESTRITO	83
3.3	AQUISIÇÃO DE DADOS DE IMAGEM E FORÇA	88
3.4	DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO <i>QUICK-STOP</i>	90
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISES	99
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
4.1	CONDIÇÕES DE CONTATO CAVACO-FERRAMENTA	102
4.1.1	<i>Condições de contato entre cavaco e ferramenta de corte com microrranhura....</i>	<i>102</i>
4.1.2	<i>Condição de contato entre cavaco e ferramentas de contato restrito.....</i>	<i>117</i>
4.1.3	<i>Condições de contato em ferramentas com microrranhura e ferramentas de contato restrito</i>	<i>119</i>
4.2	ANÁLISE DOS CAVACOS	124
4.2.1	<i>Formação de cavaco em ferramenta de corte com microrranhura</i>	<i>124</i>
4.2.2	<i>Corte ortogonal com ferramentas de contato restrito.....</i>	<i>141</i>
4.3	OBSERVAÇÕES DIRETAS NA FORMAÇÃO DO CAVACO	147

4.3.1	<i>Observações diretas na formação do cavaco com ferramentas de corte restrito..</i>	147
4.3.2	<i>Observações diretas na formação do cavaco com ferramentas com microrranhura</i>	161
4.4	FORÇAS DE CORTE	180
4.4.1	<i>Forças de corte em ferramentas de corte restrito</i>	181
4.4.2	<i>Forças de corte em ferramentas texturizadas</i>	187
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	204
6	REFERÊNCIAS	207

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das ferramentas de corte, sob o ponto de vista da otimização de sua geometria de corte, ocorreu mais intensamente a partir dos anos 1920, quando surgiram as ferramentas de contato restrito (*Restrict Contact tools* – RCT). Esse tipo de ferramenta apresentou desempenho substancialmente superior às ferramentas de corte convencionais, até então feitas apenas em aço rápido. Porém, as ferramentas de contato restrito, também conhecidas por ferramentas de contato controlado, ou ainda ferramentas interrompidas (tradução livre de “*cut-away tools*”), caíram num certo esquecimento, talvez, conforme sugere de Chiffre (1982), devido ao surgimento do metal duro nesta mesma época, cujo desempenho se mostrou muito superior.

Cronologicamente, pode-se afirmar que (Mylon) Eugene Merchant inaugurou o estudo fenomenológico do contato cavaco-ferramenta, trazendo a tribologia para a usinagem, ao publicar seu primeiro artigo largamente reconhecido pela comunidade acadêmica em 1941. O Círculo de Merchant se tornou popular e indispensável para o entendimento das forças atuantes na formação do cavaco. Dali em diante outros importantes autores contribuíram para que a usinagem deixasse de ser meramente uma arte, mas um complexo e desafiador assunto interdisciplinar a ser explorado.

Aproveitando-se dos conhecimentos recentes, Takeyama e Usui (1958) comprovaram a influência da área de contato cavaco-ferramenta sobre as forças e tensões desenvolvidas na formação do cavaco por meio do ressurgimento da ferramenta de contato restrito. Basicamente, em relação às ferramentas convencionais, essa ferramenta apresenta uma diminuição da superfície de saída, a qual tem seu contato com o cavaco artificialmente restringido. Para que as forças de usinagem se tornem menores, em comparação ao contato natural, a área da superfície de saída deve ser menor do que seria a correspondente área da zona de aderência de uma ferramenta convencional, mantidas as demais grandezas.

Depois de Takeyama e Usui (1958), o estudo das ferramentas de contato restrito ganharam um novo impulso. Praticamente todos os pesquisadores relevantes daquele período desenvolveram trabalhos com esse tipo de ferramenta publicando artigos importantes, como Oxley (1962), Usui e Shaw (1962), Wallace e Boothroyd (1964) e Armarego e Brown (1961). Modelamentos empregando a teoria da plasticidade, os “*slip lines*”, anteriormente feitos para as ferramentas de corte convencionais também passaram a contemplar as ferramentas de contato restrito.

No entanto, estes modelos não convergiam para os resultados de laboratório. A maior discordância parece ter se dado com os resultados de Lo et al. (1966) em que Armarego é um dos autores. De modo geral, os autores constataram que a força surgida em oposição ao movimento do cavaco crescia proporcionalmente ao aumento da área de contato cavaco-ferramenta, quando a espessura indeformada do cavaco era progressivamente aumentada. Porém, a partir da condição em que a área da superfície de saída da ferramenta de contato restrito era totalmente tomada, independentemente do aumento da espessura indeformada do cavaco, a força mantinha-se praticamente constante. Ademais, o grau de recalque diminuía progressivamente. Dessa forma, se tornou mais claro que a deformação no mecanismo de formação do cavaco diminuía, mudando sensivelmente, quando o corte se dá em uma área de contato menor do que aquela em que o cavaco originalmente se deformaria sobre a superfície de saída da ferramenta.

Pode-se verificar pela literatura que o próximo avanço na geometria das ferramentas de corte se deu com as ferramentas com ranhura. Conforme sintetiza Shi et al. (1993), estas ferramentas incorporaram a superfície de saída das ferramentas de corte restrito com uma ranhura adjacente em que o cavaco, em operação normal, não escoava preenchendo o seu interior, mas apenas em sua parte anterior e posterior desenvolvendo uma curvatura. A geometria da ferramenta de corte em questão se aproximou bastante do que são as ferramentas modernas em que o cavaco pode ser melhor controlado. No entanto os parâmetros que definem suas geometrias são em maior número e a resposta à variação deles ainda hoje não é totalmente dominada.

Passado um período consideravelmente longo, somente no início dos anos 2000 surgiu um novo tipo de geometria. Por meio de dois de seus primeiros trabalhos no assunto, Enomoto e coautores (Enomoto et al., 2006; Enomoto et al., 2007) introduziram a textura na ferramenta de corte, a qual deram o nome de “superfície estruturada” em um dos seus artigos e “superfície de engenharia” em outro. Com a modificação da superfície de saída da ferramenta, por meio da criação de um baixo relevo com padrões determinístico, o desempenho da ferramenta pôde ser aumentado. No caso do trabalho deles a superfície foi modificada para uma textura composta de microcavidades e usado óleo aplicado pelo método de quantidade de lubrificante (MQL) em operação de fresamento.

A partir desses dois trabalhos o número de publicações cresceu vigorosamente, tendo como outro expoente no assunto um compatriota seu, Sugihara, que juntos têm trabalhos

significativos, dentre eles pode-se citar Sugihara e Enomoto (2008) e Sugihara e Enomoto (2009).

As texturas ganharam muitas geometrias diferentes, porém, talvez a mais significativa seja as microrranhuras. A popularidade dessa geometria deve-se a sua maior facilidade de fabricação e desempenho. Por serem consideradas estruturas abertas, o fluido, quando empregado, tem maior acesso às regiões de intenso contato entre cavaco e ferramenta. Outro fator positivo é sua maior capacidade de acumular “*debris*” oriundos do processo de desgaste abrasivo tirando-os continuamente da superfície de saída, o que minimiza o desgaste de cratera.

As microrranhuras, porém, se forem equivocadamente posicionadas, em relação à aresta de corte, pode produzir o chamado corte derivativo, ou corte secundário, em que a parte debaixo do cavaco é cortada pela borda posterior da microrranhura gerando forças adicionais e efeito adverso, conforme mostram Sugihara et al. (2021).

Apesar dos avanços no modelamento da usinagem por elementos finitos as hipóteses e estimativas acerca das tensões envolvendo essas geometrias ainda não produzem resultados satisfatórios, fazendo com que Sugihara et al. (2021) afirmem que os trabalhos em laboratório devem continuar para que os fenômenos que cercam as texturas possam ser melhor compreendidos.

Diante desse assunto ainda em desenvolvimento, surge a ideia de preencher as cavidades dessas microrranhuras com um material que tenha alta condutividade térmica, atuando como um promotor do arrefecimento da região de corte e que, com o progressivo desgaste da ferramenta, esse material não seja um potencializador dos mecanismos de desgaste caso migre para a interface cavaco/ferramenta. Neste contexto se abriu a possibilidade de testar os nanotubos de carbono, cuja condutividade é uma das mais altas dentre os materiais conhecidos e, pelo fato de sua estrutura ser uma forma de grafite, pode apresentar efeito lubrificante. O trabalho recente publicado por Ribeiro et al. (2024) derivado de sua dissertação de Mestrado (RIBEIRO, 2019) mostrou resultados promissores para a aplicação dos nanotubos de carbono. No entanto, preliminarmente, ainda se faz necessário estudar mais acuradamente a posição e as dimensões da microrranhura para que ela, mesmo preenchidas com nanotubos de carbono, não venha a produzir, ou pelo menos seja minimizado, o corte derivativo, o que frustraria essas e outras tentativas de melhorar o desempenho na direção da abolição do uso dos fluídos de corte.

Diante do apresentado, este trabalho é norteado pelos seguintes objetivos: analisar e compreender a interação do cavaco frente a presença de uma microrranhura; observar as características do corte derivativo; desenvolver e aplicar um dispositivo *quick stop* e um sistema

de filmagem em corte ortogonal. Por fim, serão estudadas as diferentes variáveis de saída, comuns na avaliação do desempenho da usinagem, como força de usinagem e grau de recalque, bem como a microestrutura do cavaco formado nas diferentes condições.

Além deste capítulo introdutório, este trabalho está estruturado, basicamente, nos seguintes capítulos:

Revisão bibliográfica: composta por literaturas que buscam fornecer subsídios ao entendimento da formação de cavaco, seu contato com a ferramenta de corte e as forças desenvolvidas em razão desse contato em ferramentas de diferentes geometrias;

Materiais e métodos: descrição da montagem experimental, material do corpo de prova, fabricação das ferramentas de corte, equipamentos e instrumentos empregados, técnica utilizada na avaliação da área de contato cavaco/ferramenta, preparação metalográfica dos corpos de prova para observação microscópica, desenvolvimento e fabricação de dispositivos, em especial o *quick-stop*, e seleção das condições de usinagem;

Resultados e discussões: apresentação dos resultados dispostos por meio de imagens das ferramentas de corte, cavacos e gráficos elaborados com variáveis, uma das quais definida especificamente para o trabalho, que possibilitam alcançar o objetivo proposto;

Conclusões e trabalhos futuros: relato sucinto das conclusões que puderam ser extraídas como resultado do desenvolvimento do trabalho e, por fim, sugestões apontadas em virtude de lacunas ainda identificadas no assunto, as quais poderão ser objeto de estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo procura fornecer uma visão geral dos principais desenvolvimentos das ferramentas de corte, em relação à geometria da região da aresta de corte, partindo das ferramentas de contato restrito até alcançar as ferramentas de corte estruturadas com microrranhura, finalizando com um breve relato dos fenômenos envolvendo o contato cavaco/ferramenta.

2.1 FERRAMENTAS DE CONTATO RESTRITO

Dentre os vários caminhos para melhorar o desempenho do processo de usinagem, com o objetivo de aumentar a vida da ferramenta, têm-se verificados esforços no desenvolvimento de materiais mais resistente ao desgaste, incluindo os revestimentos, resfriamento criogênico, aplicação de fluido de corte sob alta pressão, amaciamento do material da peça por meio de calor (laser) e otimização da geometria da ferramenta de corte.

Com relação ao estudo sistemático da otimização da geometria da ferramenta de corte, cronologicamente, são identificados trabalhos incipientes neste assunto, como o de Stabler (1951), o qual foi suportado pelas teorias de Merchant (1945) a respeito dos mecanismos e mecânica na formação do cavaco. Como resultado, Stabler previu a direção da trajetória do cavaco e determinou as componentes da força de usinagem e tensões sobre o cavaco quando diferentes ângulos de saída da ferramenta de corte no torneamento oblíquo são adotados. Mais adiante, o desenvolvimento dos quebra-cavacos e o efeito deles sobre as forças de usinagem e tensões sobre o cavaco tem em Nakayama (1960) um dos trabalhos pioneiros no assunto.

No entanto, no período entre os trabalhos mencionados, Takeyama e Usui (1958) publicaram importante artigo no qual comprovaram, experimentalmente, que as forças de usinagem e as deformações envolvidas na formação do cavaco são fundamentalmente governadas pela área de contato entre cavaco e ferramenta. Utilizando ferramentas de corte de contato restrito (RCT – *restrict contact tools*), ilustrada na Figura 1, diferentes áreas cavaco-ferramenta foram cuidadosamente criadas permitindo que os autores concluíssem que a tensão de cisalhamento promotora da força tangencial sobre a superfície de saída é constante e igual à tensão de cisalhamento do material da peça (cavaco), ou seja, a lei de Coulomb não é válida nas condições em que a área real se aproxima da área aparente no contato cavaco-ferramenta. Desta forma, a força tangencial, surgida em oposição ao movimento do cavaco (“força de

atrito”), é proporcional à área de contato e independente da área de cisalhamento no plano primário.

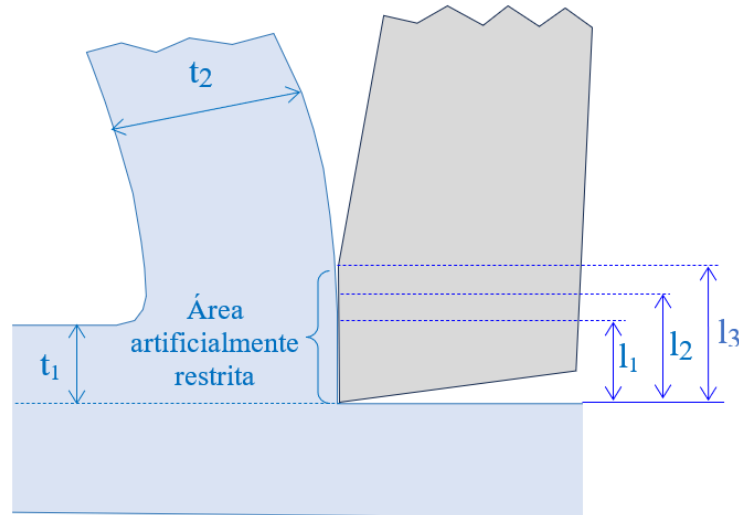


Figura 1: Ferramenta de contato restrito. Adaptado de Takeyama e Usui (1958).

Em seguida, Chao e Trigger (1959) concluíram que por meio do contato controlado cavaco-ferramenta, em que o comprimento de contato é artificialmente criado para ser menor do que o natural, são proporcionadas condições de usinagem mais favoráveis, como redução das forças normal e tangencial à superfície de saída, maior vida de ferramenta e grande sensibilidade à aplicação de fluido de corte, positiva ou negativa, dependendo das características físicas e químicas do fluido. No trabalho, os autores encontraram a menor temperatura na ferramenta de corte quando empregaram RCT com 1/3 do contato natural no torneamento do aço AISI 4142 com RTC feita em metal duro, bem como no cobre eletrolítico RTC em aço rápido.

Tanto no artigo de Wallace e Boothroyd (1964) quanto de Hsu (1966) em que uma liga de alumínio foi usinada em corte ortogonal com RTC de aço rápido (HSS), os autores exploraram a influência da “razão do comprimento de contato” sobre as variáveis de saída, como forças e tensões normal e tangencial à superfície de saída e grau de recalque. Essa razão é definida pelos autores como sendo a relação entre “comprimento de contato restrito e espessura de corte” (l/t_1). Tomando diferentes valores de l/t_1 , observou-se que a intensidade das forças é linearmente proporcional à profundidade de corte e tão maior quanto maiores os valores da razão l/t_1 , conforme apresentado no gráfico da Figura 2. Tal influência sobre a força deve-se ao aumento do comprimento de contato cavaco-ferramenta, ou seja, novamente ao

aumento da área de contato, como já tinham observado Takeyama e Usui (1958). No entanto, há um valor limite de l/t_1 acima do qual o comprimento restrito da ferramenta (l) torna-se maior que o comprimento de contato, condição que passa a ser contato natural. Acima desse valor a força passa a independe de l/t_1 e não há mais distinção entre as curvas.

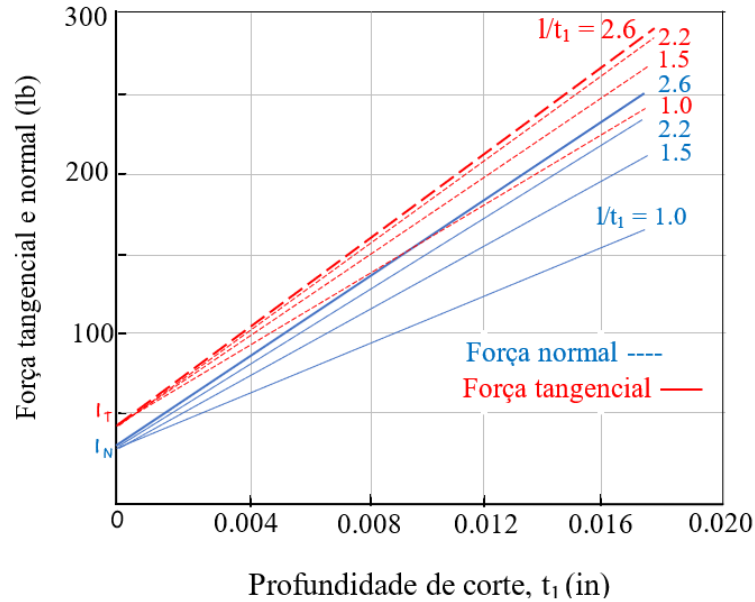


Figura 2: Força em função da profundidade corte para diferentes l/t_1 . Adaptado de Wallace e Boothroyd (1964) e Hsu (1966).

Essa condição transitória foi observada e destacada por Lo et al. (1966) que defendem mecanismos de formação de cavaco distintos no corte natural e no contato restrito. Para comprovar esta tese, os autores levantaram o comportamento do gradiente da força tangencial (K_T) e normal (K_N) em função da relação l/t_1 , a partir de dados coletados em ensaios e dispostos em gráfico apresentado na Figura 3.

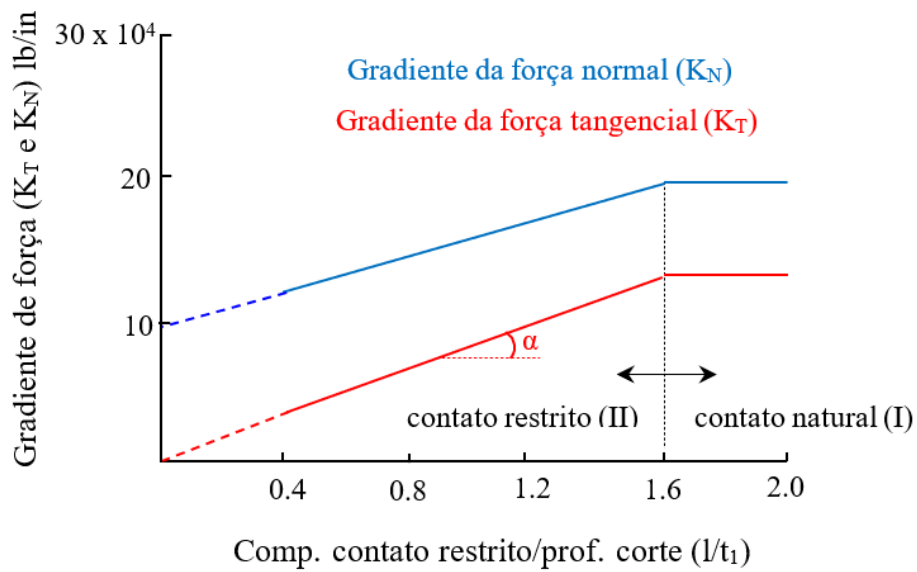


Figura 3: Gradiente de força no contato normal e restrito. Adaptado de Lo et al. (1966)

Para ressaltar o comportamento visto no gráfico da Figura 3, Lo et al. (1966) separaram as condições em que $l/t_1 > 1,6$ (I) e $l/t_1 < 1,6$ (II). No caso (I), em que o inverso de l/t_1 , ou seja, t_1/l é menor que 0,6, o contato é natural e a força tangencial cresce com o aumento de t_1 , conforme disposto na Figura 2, isto é, $F_{TI} = K_{TI}t_1 + I_T$, sendo K_{TI} o gradiente da força tangencial. No caso (II), quando $l/t_1 < 1,6$, ou seja, t_1/l maior que 0,6, o contato passa a ser restrito e a força depende tanto de t_1 quanto de t_1/l , isto é, $F_{TII} = K_{TII}t_1 + I_T$, onde $K_{TII} = C_T t_1 (t_1/l)$ ou, ainda, $K_{TII} = C_T t_1 (l/t_1) = C_T l$. Portanto, a força tangencial, assim como analogamente à força normal, tem como gradientes um valor constante (K_{TI}) e valores linearmente variáveis, proporcionados por $K_{TII} = C_T l$, sendo $C_T = \tan \alpha$ (α o coeficiente angular da reta na Figura 3).

Detendo-se nos valores de t_1/l , os autores reiteraram a existência de uma certa razão crítica, $(t_1/l)_{cr}$, acima da qual foi identificada a redução no grau de recalque e aumento do ângulo de cisalhamento. Ademais, observaram que para valores de $t_1/l < (t_1/l)_{cr}$ a força tangencial é proporcional à espessura de corte, guardando uma relação linear, como apresentado na Figura 2. Neste caso, o comprimento de contato cavaco-ferramenta é menor do que o comprimento da ferramenta (l), tal qual no corte natural. Por outro lado, quando $t_1/l > (t_1/l)_{cr}$ o contato entre cavaco e ferramenta passa a ser integral, não mais dependendo da espessura de corte, sendo a intensidade da força mantida. No entanto, a partir deste ponto a força se torna dependente da relação $(t_1/l)_{cr}$, aumentando com valores crescentes de comprimento de contato controlado (l). O comportamento descrito resultou de testes,

representados no gráfico da Figura 4, nos quais se utilizou quatro diferentes comprimentos de contatos restritos: $l = 0.010''$; $0.015''$; $0.020''$; e $0.030''$. No gráfico, pode-se identificar o valor de $(t_1/l)_{cr} = 0.6$. Para o maior valor de l , isto é, $0.030''$, a ferramenta de contato restrito se comporta como uma ferramenta convencional, uma vez que a espessura de corte (t_1) é insuficiente para que a totalidade do comprimento restrito seja alcançado.

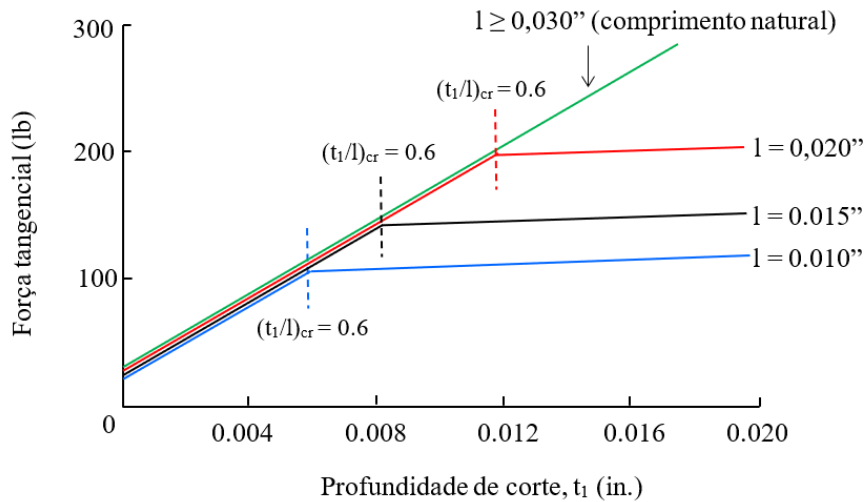


Figura 4: Força em função da espessura indeformada de cavaco para diferentes comprimentos de contato restrito. Adaptado de Lo et al. (1966).

A Figura 5 mostra a usinagem quando $t_1/l < 0,6$ (Figura 5a) e quando $t_1/l > 0,6$ (Figura 5b), em que os autores chamaram a atenção às diferenças nas direções assumidas pelos cavacos, ao deixarem a superfície de saída da ferramenta, entre os dois casos. Diante deste fato, Fang e Jawahir (2002) definiram o ângulo da trajetória do cavaco (η), representado Equação (1) como sendo o ângulo entre a velocidade do cavaco, na iminência de sua saída da ferramenta, e o plano perpendicular à velocidade de corte. No caso em que $t_1/l < 0,6$, nota-se que o ângulo η_a é claramente menor que η_b , quando $t_1/l > 0,6$. Ademais, este ângulo é dado pela equação (1), onde V_x e V_y são as componentes da velocidade do cavaco na direção da velocidade de corte e em seu plano perpendicular, respectivamente. Por fim, medindo-se o grau de recalque em todas as condições empregadas, as mesmas que resultaram nos gráficos da Figura 2, Figura 3 e Figura 4, obtém-se o gráfico da Figura 6 em que, novamente, é possível identificar o mesmo valor de t_1/l crítico, isto é, $0,6$. Diante de todos os resultados, os autores concluíram que em torno desse valor a deformação do cavaco sofre mudança. De fato, na Figura 7, Usui e Shaw

(1962) mostraram diferenças significativas na deformação do cavaco entre o contato natural (Figura 7a) e o contato restrito (Figura 7b).

$$\eta = \arctan \frac{V_x}{V_y} \quad (1)$$

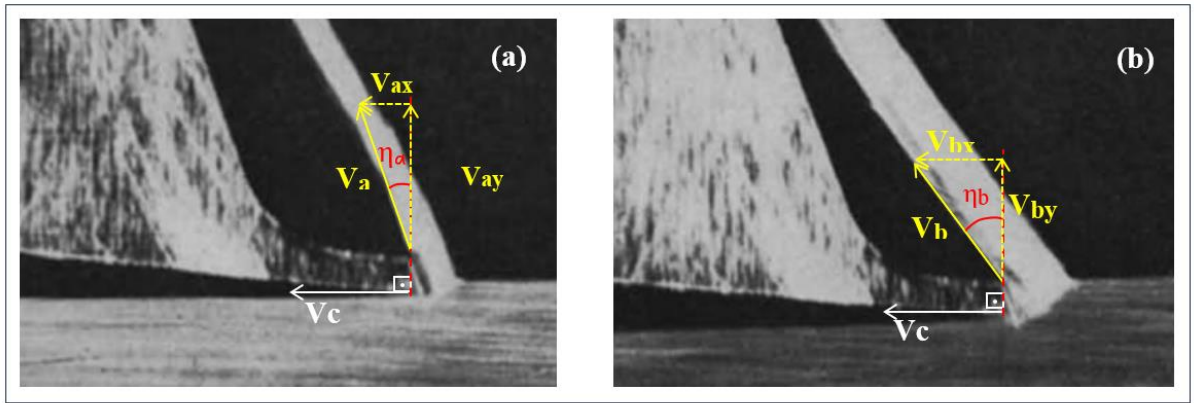


Figura 5: Usinagem quando (a) $t_1/l < 0,6$ e (b) $t_1/l > 0,6$. Adaptado de Lo et al. (1966)

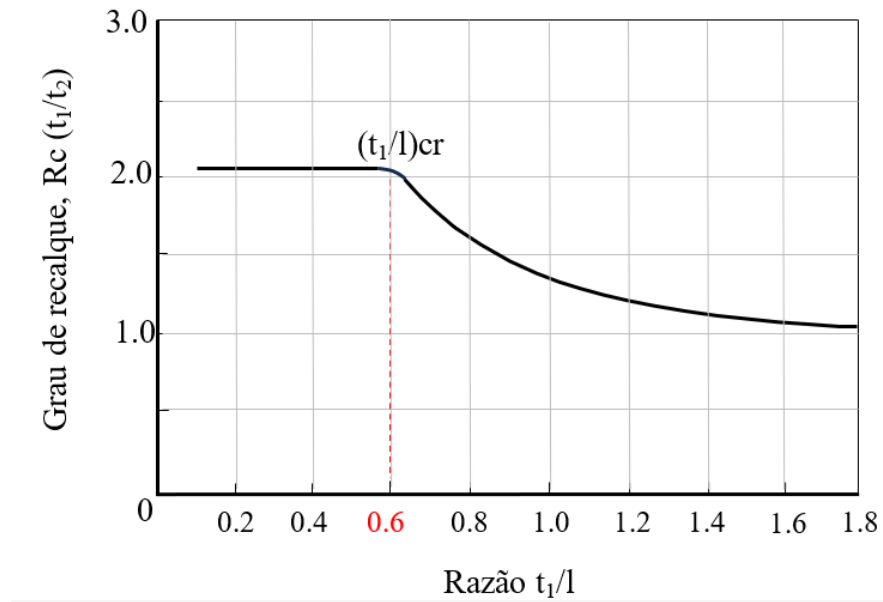


Figura 6: Grau de recalque em função da razão t_1/l . Adaptado de Lo et al. (1966).

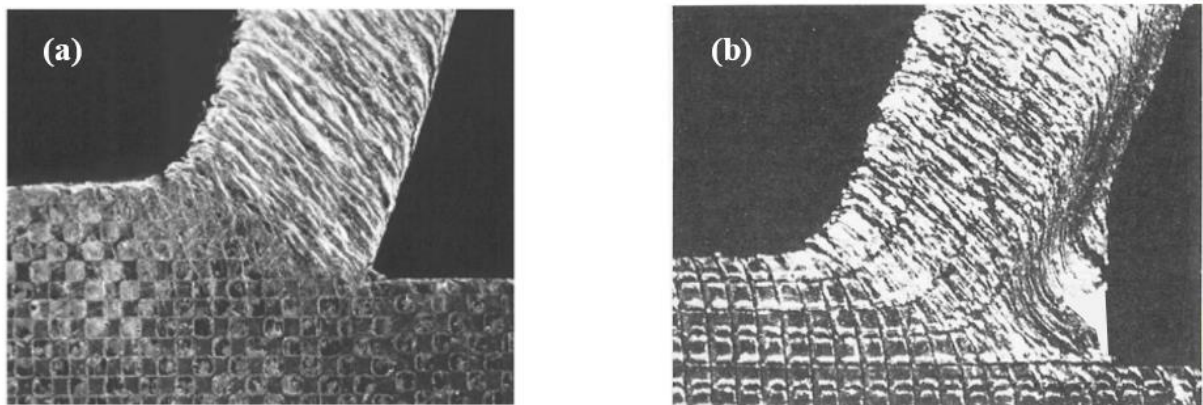


Figura 7: Cavaco formado no (a) contato natural e (b) restrito. Adaptado de Usui e Shaw (1962).

Após o trabalho de Lo et al. (1966) que tem em Edwin J. A. Armarego o seu prestigiado coautor, Rubenstein (1968) ratificou os resultados por eles encontrados, em termos de força tangencial e normal. Passados, aproximadamente, 13 anos, De Chiffre (1981) põe as ferramentas de contato restrito novamente em foco ao empregá-las no estudo do efeito do fluido de corte no torneamento. Tomando a relação comprimento de contato restrito/avanço, o qual denominou “fator de comprimento de contato” (n), o autor identificou um valor de avanço crítico a partir do qual o contato cavaco/ferramenta passava a ser integral e a força tangente à superfície de saída, então, mantinha-se praticamente constante, comportamento que já foi amplamente percorrido até aqui. A novidade se deu na constatação de que na aplicação de fluido de corte (emulsão a 5%), no torneamento ortogonal de um aço de baixo carbono com ferramenta de aço rápido, o fator de comprimento de contato (n) diminuía em relação ao corte em seco, sinalizando a redução do contato cavaco/ferramenta. Como resultado direto destas observações, bem como de outras contidas em seu trabalho, De Chiffre (1981) pôde concluir que o fluido de corte atua na minimização dos mecanismos de adesão e na diminuição do raio de curvatura do cavaco, seja por diminuir a temperatura geral da região de corte seja, em menor grau, pelo efeito Rehbinder. O fato, incontroverso, segundo o autor, é a minimização da área de contato como efeito da aplicação do fluido de corte.

Como pode-se notar, as ferramentas de contato restrito são capazes de manter a intensidade da força tangencial, mesmo em taxas de remoção crescentes, refletindo em menor deformação do cavaco e em menor grau de recalque. Além disso, conforme Chao e Trigger (1959) afirmaram, essas ferramentas são úteis ao estudo da usinagem por permitirem observações mais diretas do efeito do contato cavaco-ferramenta. Deve ser por esta razão que

na época destacados pesquisadores da área desenvolveram suas teorias empregando estas ferramentas, tais como Armarego, Boothroyde, Chao, Nakayama, Rubenstein, Shaw, Takeyama, Trigger e Usui, que participaram dos trabalhos até aqui citados, além de outros não mencionados, como Albrecht (1960) e Oxley (1962).

Voltando ao último gráfico, da Figura 6, de Lo et al. (1966), que explicita a dependência do grau de recalque em relação à razão t_1/l , foi observado dois comportamentos distintos separados pelo valor crítico de t_1/l . Este resultado foi validado por Mittal e Juneja (1982) que estudaram experimentalmente o ângulo de cisalhamento primário, o qual guarda estreita relação com o grau de recalque. Porém, os resultados obtidos mostraram significativas discrepâncias com aqueles obtidos por modelos analíticos propostos por outros autores. De fato, além dos trabalhos teóricos, também os experimentais não confirmaram totalmente os achados de Lo et al. (1966) e Mittal e Juneja (1982).

Com o intuito de exemplificar a variedade de resultados encontrados na literatura envolvendo o grau de recalque, na Figura 8 é disposto uma compilação de trabalhos representativos de diferentes autores, cujas condições de usinagem estão contidas na Tabela 1. Nota-se que os trabalhos de Wallace e Boothroyd (1964) e de Hsu (1966) apresentam comportamentos parecidos, uma vez que as condições experimentais também são bastante próximas. Ainda que os dois autores não tenham ressaltado a existência de uma região na qual R_c inflexiona para valores praticamente constantes, observa-se que as menores razões de t_1/l progridem para esta situação, tendendo a um patamar similar ao encontrado por Lo et al. (1966). Dois motivos podem ter contribuído para que os autores das curvas 1 e 2 não tenham identificado tal região, que correspondente à transição entre o comprimento natural e restrito. Primeiro, o fato de que R_c , quando disposto em função da razão inversa, isto é, l/t_1 , apresenta uma curva com comportamento monótono, sem mudança abrupta de seus gradientes, como originalmente as duas curvas (1 e 2) foram construídas, mas aqui adaptadas para t_1/l ; segundo, as combinações dos valores de t_1 e l usadas nos experimentos não alcançaram razões t_1/l tão pequenas quanto aquelas da curva 5, que chegou a 0,067.

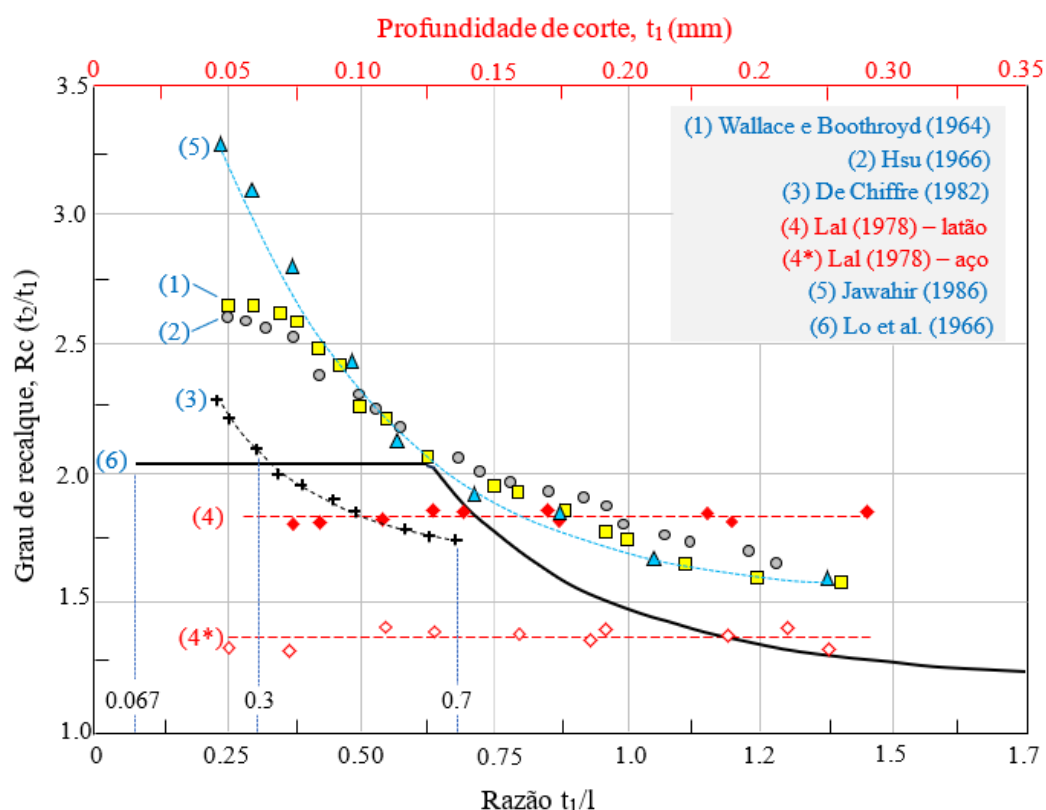


Figura 8: Graus de recalque em diferentes trabalhos encontrados na literatura.

Tabela 1: Condições empregadas nos trabalhos da Figura 8.

Ref.	Material	Ferram.	Ângulo (°)	Raio (mm)	Vc (m/min)	t_1 (mm)	l (mm)
(1)	Al (HE-10-WP)	HSS	30	0,005	48	0,26-0,52	0,3-1,58
(2)	Al (HE-10-WP)	HSS	30	0,025	48	0,17-0,52	(0,75 a 4) x t_1
(3)	Al (51SWP)	HSS	12	0,15	50	0,3-0,8	0,7-2,0
(4)	70Cu-30Zn	HSS	20	N.I.	0,085	0,05-0,3	comp. natural
(4*)	AISI 1045	HSS	20	N.I.	0,085	0,05-0,3	comp. natural
(5)	AISI 1045	P20	0	N.I.	100	0,1 -0,3	0,24-1,33
(6)	Al (65ST6)	HSS	20	N.I.	0,18 e 30	0,05-0,8	0,25-0,76

“N.I.”: não informado; todas as condições sem fluído de corte; “Ângulo”: ângulo de saída; Raio: raio da aresta de corte.

Com relação às investigações de Lal (1978), os valores constantes de R_c , obtidos em função de t_1 , tanto para o latão (curva 4) quanto para o aço (curva 4*), referem-se exclusivamente ao corte natural, o que vai de encontro aos resultados de Lo et al. (1966). Em comum, esses dois trabalhos empregaram valores de t_1 que partem de 0,05 mm indo até 0,3 mm, no caso de Lal (1978), e 0,43 mm, no caso de Lo et al. (1966), correspondendo à razão t_1/l

de, aproximadamente, 0,57, no limite do contato natural com o restrito. Já nas curvas 1 e 2, a região em que R_c tende a um valor constante sugere ser de corte natural, e ambas as inflexões das curvas estão em torno de t_1/l igual a 0,38. De fato, ao tomar o gráfico da Figura 3, cujos resultados são oriundos desses dois trabalhos, é observado que a força obtida em função de t_1 , para diferentes valores de l/t_1 , tem na reta de $l/t_1 = 2,6$, ou seja, $t_1/l = 0,38$, a condição limite entre o corte natural e restrito.

Quanto à curva 3, criada a partir dos resultados de De Chiffre (1982), presentes também em De Chiffre e Wanheim (1985), tem em seu comportamento um dos mais difundidos na literatura, podendo encontrá-lo em Ferraresi (1977) e Shaw (2005) por exemplo; ainda que nesses dois livros os resultados não sejam próprios dos autores. Enquanto Ferraresi recorre à Vieregge (VIEREGGE, 1959), Shaw cita De Chiffre (1982). Mas, distintamente dos autores vistos até aqui, em De Chiffre não há grau de recalque constante e nem aponta para um valor que o seja. Este fato não deixa de ser intrigante pois, assim como em Lo et al. (1966), o autor identifica a manutenção da intensidade da força tangencial a partir de um avanço crítico (f_{cr}) alcançado, o qual produz contato integral entre cavaco e comprimento da ferramenta. Procurando por esse valor crítico em seus trabalhos, tanto em De Chiffre (1982) quanto em De Chiffre (1988), é possível estimar que, para suas condições vistas na Tabela 1, f_0 pode estar situado por volta de 0,30 mm/volta o qual, para um comprimento restrito de 1,0 mm usado em comum nos dois artigos, corresponde a t_1/l igual a 0,30. No entanto, ao observar essa região da curva 3 não se nota qualquer inflexão. Considerando então esse valor, toda porção à sua direita (t_1/l de 0,3 a 0,7, aproximadamente) refere-se ao corte restrito, representando a maior parte do gráfico, tendo a partir daí comportamento similar a outros trabalhos.

Com os resultados de seus experimentos, sob suas condições de usinagem particulares, De Chiffre (1982) e De Chiffre e Wanheim (1985) extraíram a Equação (2) para o grau de recalque:

$$R_c = \sqrt{1 + \frac{l}{t_1} \cos \gamma} \quad (2)$$

onde: γ é o ângulo de saída da ferramenta de corte.

Observa-se, pela Equação (1) que o grau de recalque tende a unidade quando as razões t_1/l assumem valores acentuadamente altos, o que, de fato, fisicamente é plausível. No entanto, a diminuição de t_1/l preveria graus de recalque crescentes e extremamente altos para razões

diminutas, como aquela de 0,067 alcançada por Lo et al. (1966), correspondendo a $t_1 = 0,002''$ e $l = 0,030''$, mas que experimentalmente se mostraram inalterados no corte natural.

Em consulta privada feita à Leonardo De Chiffre, Professor Emérito da *Technical University of Denmark*, a respeito dos resultados conflitantes, principalmente se comparados com os de Lo et al. (1966), o professor respondeu que: de fato o comportamento das ferramentas de corte restrito é intrigante e vale a pena conduzir investigações adicionais (tradução literal de “Indeed, the behavior of restricted contact cutting tools is intriguing and worth further investigations”).

No entanto, mais pontos passíveis de questionamentos podem ser notados na literatura. Em seu livro, Shaw (2005), página 134-135, admite a curva de De Chiffre (1982) e sua respectiva Equação (2). Porém, curiosamente, Shaw, juntamente com Becker e Marshall (Becker et al., 1952), encontraram valor constante para o grau de recalque no corte ortogonal de um aço de baixo carbono (SAE 1112) com ferramenta de metal duro, ângulo de saída nulo e profundidades de corte entre 0,05 e 0,3 mm, em corte exclusivamente natural. Ademais, Usui e Shaw (1962), pelo fato de terem identificado deformações distintas do cavaco no corte natural e restrito, como é mostrado na Figura 7, poderiam ter feito alguma discussão acerca do comportamento monótono (ou não) do grau de recalque, ainda que não fosse objetivo direto da investigação.

Um dos trabalhos mais tardios sobre ferramentas de contato restrito foi de Jawahir (1988), revisitado em Fang e Jawahir (2002), mas neste último com enfoque no controle da forma do cavaco e sua predição, incluindo o grau de recalque. Ainda que os autores tenham defendido a boa concordância entre os valores experimentais e teóricos, modelados com auxílio da teoria da plasticidade (*slip line*), verifica-se que a diferença entre eles aumenta significativamente com a diminuição de t_1/l , chegando a alcançar 50%. O comportamento do grau de recalque encontrado por Jawahir, exposto na curva 5 da Figura 8, guarda semelhança com os resultados de De Chiffre (curva 3), uma vez que em ambos não há tendência a um valor constante e nem distinção de transição entre corte natural e restrito.

Por fim, outros dois trabalhos conduzidos com ferramentas convencionais de aço rápido, em corte ortogonal, na ausência de fluido de corte, podem ser mencionados. No primeiro, Creveling et al. (1957) usaram um aço de baixo carbono (SAE 1113), sob velocidade de corte de 8,3 m/min, empregando quatro diferentes profundidades de corte (0,05, 0,15, 0,20 e 0,25 mm) para cada um dos quatro ângulos de saída empregados: 25°, 30°, 35° e 40°. Como resultado, os autores apontaram que, para cada ângulo de saída, o grau de recalque se manteve

praticamente constante com a variação da espessura de corte , assumindo menores valores com o aumento do ângulo de saída. No segundo trabalho, Dugdale e Enahoro (1964) usinaram alumínio (HE 10 WP) e cobre puro utilizando ferramenta de corte com ângulo de saída de 40° sob profundidades de corte entre 0,7 e 1,9 mm, as maiores dentre os artigos citados. Como consequência, aqui também se obteve graus de recalque constantes, de aproximadamente 1,6 para o alumínio e 2,7 para o cobre. Assim, esses dois artigos se somam às discrepâncias verificadas entre os diversos estudos sobre o grau de recalque, seja em parte ou na totalidade.

Em relação às ferramentas convencionais, as ferramentas de contato restrito permitem maiores possibilidades de interferir nos mecanismos de formação do cavaco e na sua forma, porém ainda com controle limitado. Na busca por uma geometria de ferramenta de corte mais efetiva para o controle da forma do cavaco e sua quebra em comprimentos previsíveis, sem o indesejável aumento acentuado das forças provocado pelos quebra-cavacos obstrutivos, surgiram as ferramentas com ranhuras. A Figura 9 ilustra uma ferramenta com ranhura e suas principais características geométricas

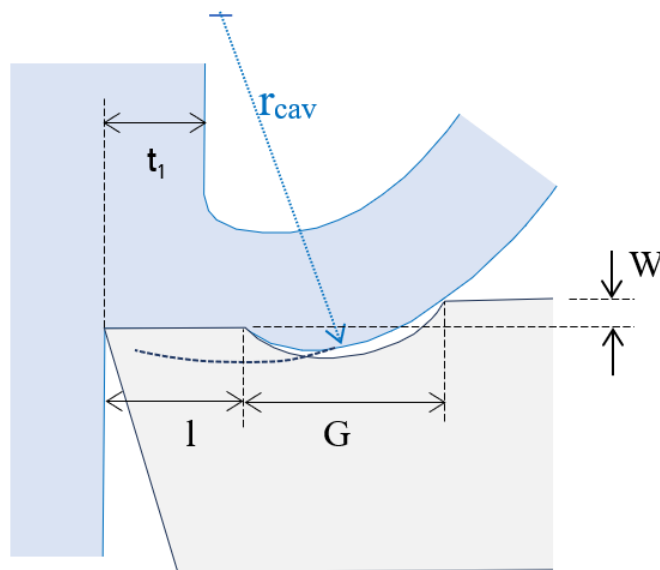


Figura 9: Ferramenta com ranhura para controle de cavaco. Adaptado de Shi et al. (1993).

Conforme descreve Shi et al. (1993), quando $l/t_1 \geq l_n/t_1$, isto é, o comprimento da superfície de saída (l) é maior do que o comprimento de contato natural (l_n), tudo se passa como uma ferramenta convencional. Por outro lado, quando a relação l/t_1 assume valores pequenos o corte se dá por contato restrito, fazendo com que o cavaco entre parcialmente no interior da ranhura, escoando nas imediações de sua borda anterior. Ao mesmo tempo, o cavaco também

entra em contato com a borda posterior da ranhura, sendo, então, definitivamente curvado. Tal situação está representada na Figura 9.

Nessas ferramentas de corte, além do comprimento de contato (l) e a profundidade corte (t_1), a dimensão da ranhura (G) e a altura do obstáculo (W) influenciam na deformação e forma do cavaco, refletindo na força de corte, raio de curvatura e grau de recalque, guardado constantes os demais parâmetros de entrada. Na Figura 10 e Figura 11, adaptadas de Shi et al. (1993), procura-se resumir o efeito desses parâmetros de entrada no processo, cujas condições de ensaio foram as mesmas de Usui et al. (1964) para o corte com ferramentas de contato restrito, em que o comprimento de contato é maior que o comprimento natural. Aqui o autor usa a relação l/t_1 , em vez de t_1/l , mas que também é comum nos trabalhos acerca do assunto.

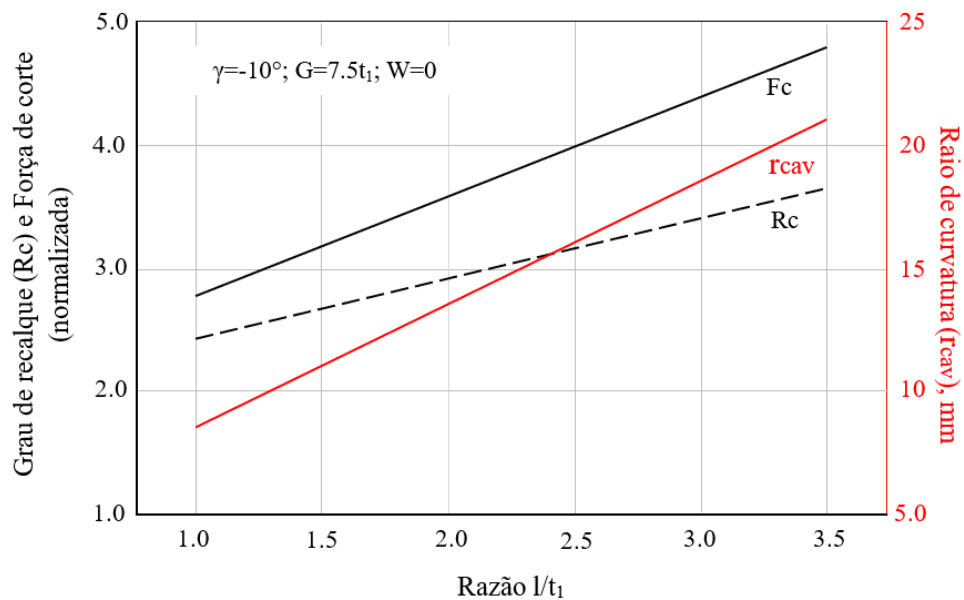


Figura 10: Grau de recalque, força de corte e raio de curvatura do cavaco em função de l/t_1 . Adaptado de Shi et al. (1993).

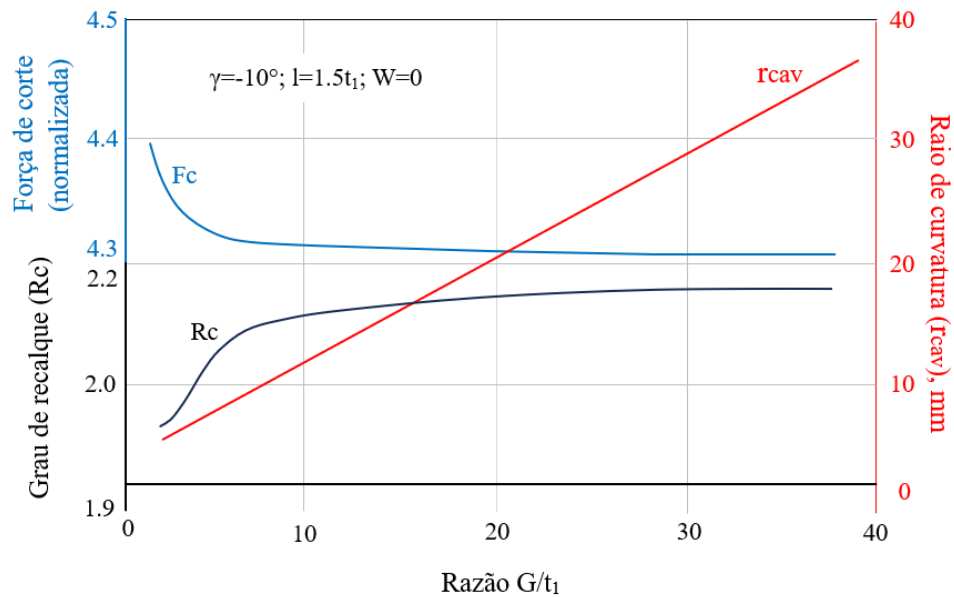


Figura 11: Grau de recalque, força de corte e raio de curvatura do cavaco em função de G/t_1 . Adaptado de Shi et al. (1993).

De maneira geral, o comportamento da ferramenta com ranhura parece se assemelhar à ferramenta de contato restrito. Mas, se nota inconsistências entre as publicações. Por exemplo, enquanto Shi et al. (1993) não menciona um valor crítico de t_1/l , a partir do qual a força de corte diminui, como é comum se identificar nas ferramentas de contato restrito, Worthington (1976) encontra este valor. A questão da altura do obstáculo (W) também é controversa, uma vez que Shi et al. (1993) aponta para valor constante da força de corte, enquanto Fang e Jawahir (2002), que trabalham somente com essa variável de saída, mostram um comportamento diverso, como pode ser verificado na Tabela 2 na qual parte dos resultados é mostrada.

Tabela 2: Força de corte em função de l/t_1 .

t_1/l	l/t_1	t_1 (mm)	l (mm)	G (mm)	W (mm)	F_c (N)
0,55	1,8	0,2	0,36	1,5	0,1	1340
0,55	1,8	0,2	0,36	1,5	0,0	1295
0,55	1,8	0,2	0,36	1,5	-0,14	1305
0,8	1,2	0,3	0,36	1,5	0,1	1705
0,8	1,2	0,3	0,36	1,5	0,0	1585
0,8	1,2	0,3	0,36	1,5	-0,14	1665

Obs: aço SAE 1045; ferramenta de metal duro (P20); $\gamma = 0^\circ$; $V_c = 100\text{m/min}$.

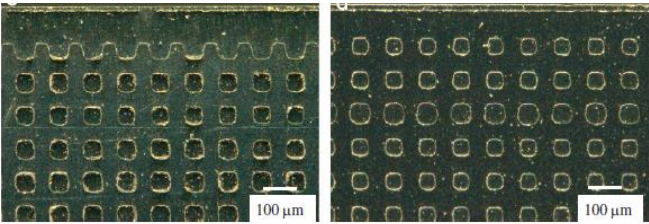
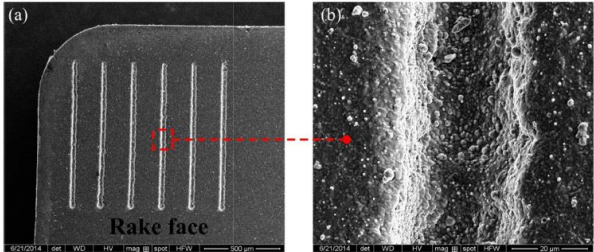
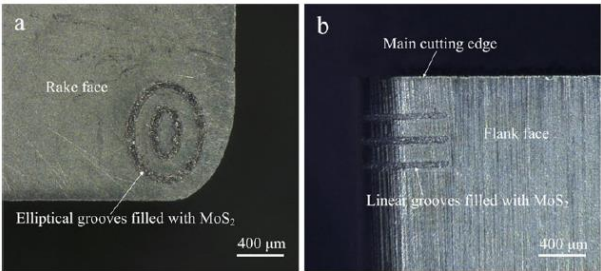
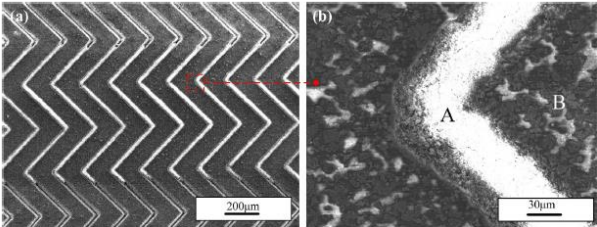
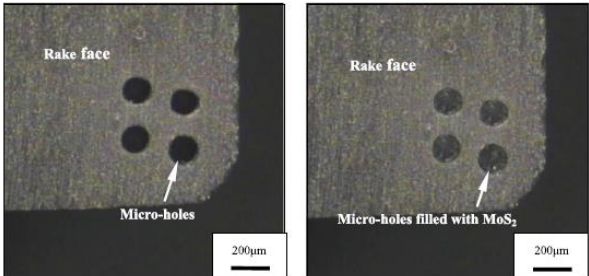
Diferente das ferramentas de contato restrito, as ferramentas com ranhura contam com número de publicações significativamente menor. Importantes autores, como Trent e Wright (2000), Klocke (2011) e, mesmo, Ferraresi (1977), não fazem menção a elas, tratando apenas de exemplos ilustrativos de ferramentas com quebra-cavacos. Shaw (2005) por sua vez, apresenta um capítulo, denominado “Controle de cavaco”, mas que não descreve os mecanismos de formação e da forma dos cavacos gerados pelas ferramentas com ranhura, uma vez que sequer as define segundo sua geometria. Esta carência talvez seja justificada pela afirmação de Shaw que, em seu livro, diz que o controle do cavaco é de previsão muito difícil, embora sua quebra em pedaços manejáveis seja importante para a indústria.

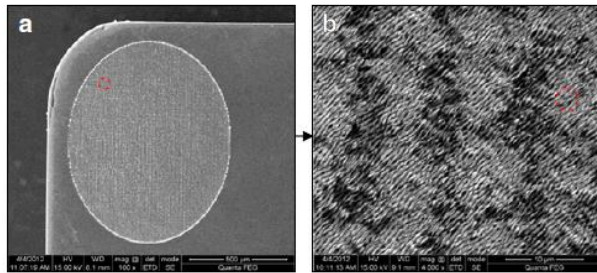
2.2 FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS E ESTRUTURADAS

Na direção ao desenvolvimento de ferramentas de corte que proporcionam redução da área de contato, e os benefícios decorrentes dela, surgiram as ferramentas de corte com superfície de saída e/ou de folga estruturadas ou texturizadas. Simplificadamente, se referem à superfície geralmente constituída por um relevo contendo microrranhuras ou microfuros (*dimples*) dispostos segundo um padrão determinístico. Esta definição, depreendida de Evans e Brian (1999), está mais voltada ao que denominaram de superfícies estruturadas, ao passo que as superfícies texturizadas compreenderiam a modificação de uma superfície, originalmente composta por rugosidade e ondulação, por outra também composta por características micrométricas, mas de padrão determinístico. Como pode-se notar, por serem definições sutilmente próximas, a literatura normalmente as trata como sinônimo, usando uma ou outra.

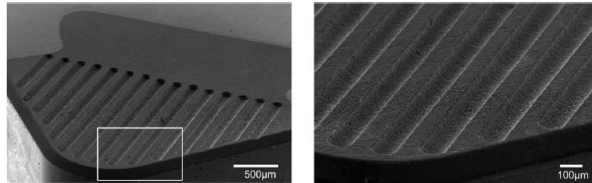
Na investigação levantada por Ribeiro (2019) foram verificados os inúmeras tipos de textura/estrutura produzidas na superfície de flanco da ferramenta e, principalmente, na superfície de saída da ferramenta de corte. Na Tabela 3 são apresentados os principais tipos de texturas/estruturas encontrados nas publicações sobre o assunto com o(s) respectivo(s) autor(es).

Tabela 3: Tipos de textura/estrutura encontrados na literatura. Adaptado de Ribeiro (2019)

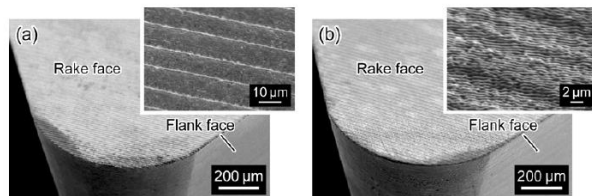
	Microfuros (OBIKAWA et al., 2011)
	Microrranhuras (ZHANG et al., 2015)
	Microrranhuras elípticas na superfície de saída e lineares no flanco preenchidas com MoS₂ (WU et al., 2014)
	Microrranhuras em zig-zag (XING et al., 2013)
	Microfuros preenchidos com MoS₂ (WENLONG et al., 2011)



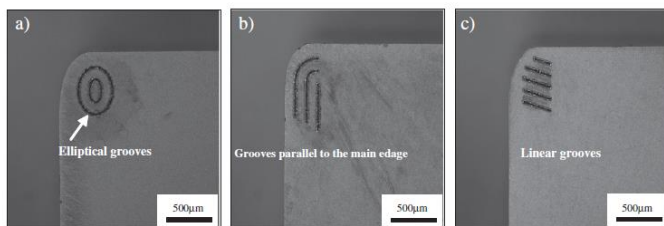
Nanoranhuras (LIAN et al., 2013)



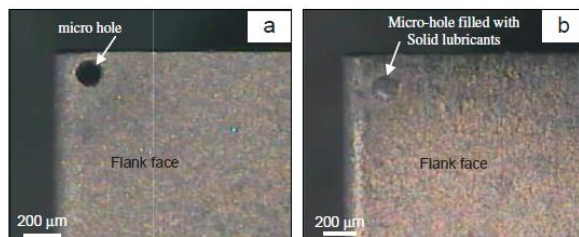
Microrranhuras abauladas (KIM et al., 2016)



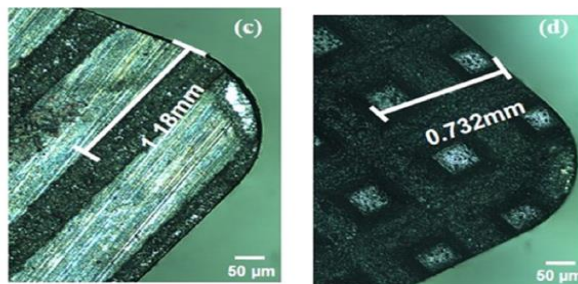
Microrranhuras e nanoranhuras (KAWASEGI et al., 2009)



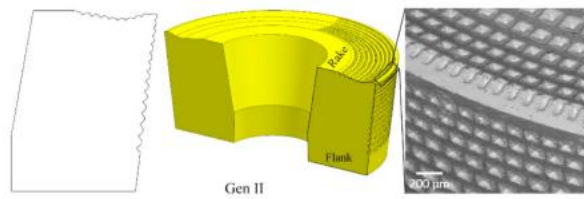
Microrranhuras elípticas, curvas e lineares (JIANXIN et al., 2012)



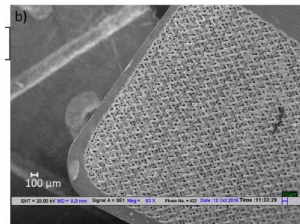
Microfuro com lubrificante no flanco da ferramenta (JIANXIN; WENLONG; HUI, 2009)



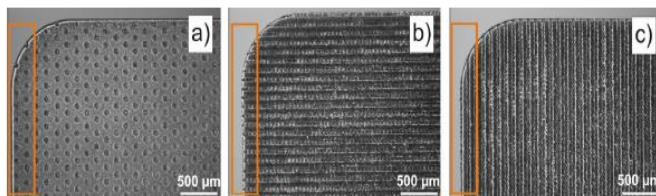
Microrranhuras lineares e cruzadas (ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR; KUMAWAT, 2016)



Microfuros no flanco e na superfície de saída (ALAGAN et al., 2018)



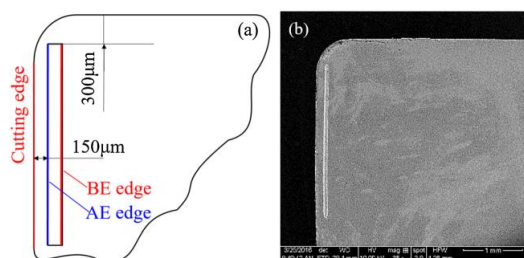
Micro e nanorranhuras alternadas (MISHRA; GHOSH; ARAVINDAN, 2018)



Microfuros e microrranhuras em diferentes posições (KÜMMEL et al., 2015)



Texturização mista com microfuros e microrranhuras (SIJU; WAIGAONKAR, 2021)



Microrranhura única (DUAN et al., 2017)

O estudo do efeito das texturas sobre as condições tribológicas entre superfícies em deslizamento é muito anterior a sua aplicação nas ferramentas de corte, como pode ser atestado no artigo publicado por Moore (1969), em que é apresentado uma revisão histórica sobre o assunto. No entanto, pode-se considerar que os precursores na aplicação em ferramentas de corte sejam Enomoto e Sugihara, quer publicando em dupla quer como coautores. Por meio de

pesquisa na literatura, pode-se verificar que esses autores são os que têm maior número de publicações e citações sobre o assunto, observando-se os seguintes trabalhos: Enomoto et al. (2006), Enomoto et al. (2007), Sugihara e Enomoto (2008), Sugihara e Enomoto (2009), Kawasegi (2017), Enomoto e Sugihara (2010), Sugihara e Enomoto (2012) e Sugihara e Enomoto (2013), até recentemente, como Sugihara et al. (2021).

Esses autores, encontraram diversos benefícios na aplicação de texturas às ferramentas de corte, em comparação com as ferramentas convencionais, destacando-se menores desgaste, adesão, temperatura, atrito e força tangencial à superfície de saída. Em comum a todos os trabalhos, a principal razão citada para a obtenção dessas vantagens está na redução do comprimento de contato cavaco-ferramenta, isto é, na área desta interface, que conforme visto nas ferramentas de corte restrito desempenha papel fundamental na força de usinagem.

No entanto, Sugihara et al. (2021) ressaltam que a adoção de uma geometria de textura inadequada pode ser ineficaz ou até mesmo produzir desempenho adverso ao desejado. Özel et al. (2021) mencionam que texturas em forma de microfuros, consideradas do tipo fechada, por não se expandirem para além da região de contato cavaco-ferramenta, são capazes de estabilizar uma fina camada de material aderida sobre a superfície da ferramenta de corte. Depois de formada, a estabilização desta camada diminui a frequência de micro fragmentos arrastados, os quais levam consigo material da superfície da ferramenta, protegendo-a do desgaste de cratera. Porém, microrranhuras consideradas do tipo abertas, perpendiculares ou paralelas ao movimento do cavaco, causam desestabilização da camada aderida produzindo arrastamento frequente de seu material, agravado pelo segundo tipo, conforme indicam os resultados de Kümmel et al (2015).

Esch et al. (2021) usinaram uma liga de alumínio com onze tipos de microrranhuras variando a profundidade, largura e distâncias entre elas, sendo seis orientadas perpendicularmente ao movimento do cavaco e cinco paralelamente. Por apresentarem menor força de corte e atrito, dois tipos de microrranhuras paralelas ao movimento do cavaco foram recomendados. Contudo, a orientação paralela ao movimento do cavaco é contraindicada pela maioria dos trabalhos, tal como citado por Chen et al.(2019), Ribeiro et al. (2020) e Zhou et al. (2022) em suas revisões da literatura. Isso se deve ao indesejado fato de o cavaco ser conformado dentro das ranhuras fazendo com que a força tangencial aumente, além da textura perder a capacidade em armazenar “debris” de desgaste em seu interior, cuja função seria importante por minimizar o mecanismo de desgaste abrasivo sobre a superfície de saída.

Diante do resultado controverso obtido por Esch et al. (2021), que tem F. Klocke como um dos coautores, os pesquisadores concluíram que a falta de consenso, não apenas neste resultado, se deve a grande variedade de parâmetros envolvidos na definição de uma textura, cujos valores não se repetem entre os trabalhos publicados. Este argumento ainda pode ser reforçado pela diversidade de refrigeração/lubrificação usada, além da condição a seco, sem fluido.

Usando este mesmo argumento, Sugihara et al.(2021) consideram que a ausência de diretrizes balizadoras que auxiliem na definição das características das texturas torna o processo de seu projeto uma tarefa empírica. Os autores prosseguem dizendo que apesar do modelamento por elementos finitos estar sendo recentemente empregado nesta tarefa sua simulação exige grande número de hipóteses e estimativas envolvendo, por exemplo, a definição das tensões em suas superfícies complexas, cuja inadequação leva à resultados enganosos. Por isso, sustentam que observações da deformação e escoamento do cavaco nas imediações das cavidades se fazem necessárias.

Nesse mesmo trabalho, Sugihara et al. (2021) analisa o comportamento da força tangencial (F_{Tt}) e normal (F_{Nt}) à superfície de saída de uma ferramenta com uma microrranhura por meio da comparação de cada uma delas com suas respectivas componentes no corte natural, isto é, a força tangencial (F_{Tc}) e a força normal (F_{Nc}) medidas na ferramenta de corte convencional, sob as mesmas condições. A força tangencial é tratada pelos autores como a força de atrito na interface cavaco/ferramenta. Essa comparação é feita, então, definindo-se duas razões: $\eta_F = F_{Tt}/F_{Tc}$ e $\eta_N = F_{Nt}/F_{Nc}$.

A Figura 12a apresenta as dimensões da microrranhura e sua posição em relação à aresta de corte. A Figura 12b representa a superfície de saída da ferramenta de corte convencional com as marcas deixadas pelo cavaco, pelas quais, por meio de observação em microscópio ótico, foram estimadas as zonas de aderência e escorregamento. O corte se deu de modo ortogonal em uma liga de alumínio, utilizando uma ferramenta de metal duro, sob profundidades de corte entre 15 e 75 μm .

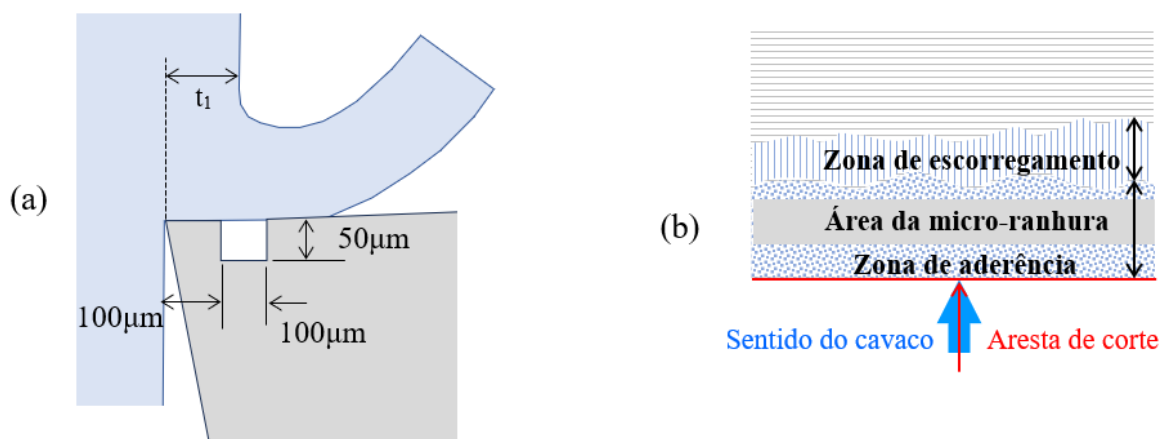


Figura 12: Representação: (a) posição e medidas da microrranhura, (b) marcas do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta convencional. Adaptado de Sugihara et al. (2021).

A Figura 13 representa as medições das zonas de aderência e escorregamento na ferramenta de corte convencional com a virtual posição da área de uma microrranhura com largura de 100 μm distante à 100 μm da aresta de corte.

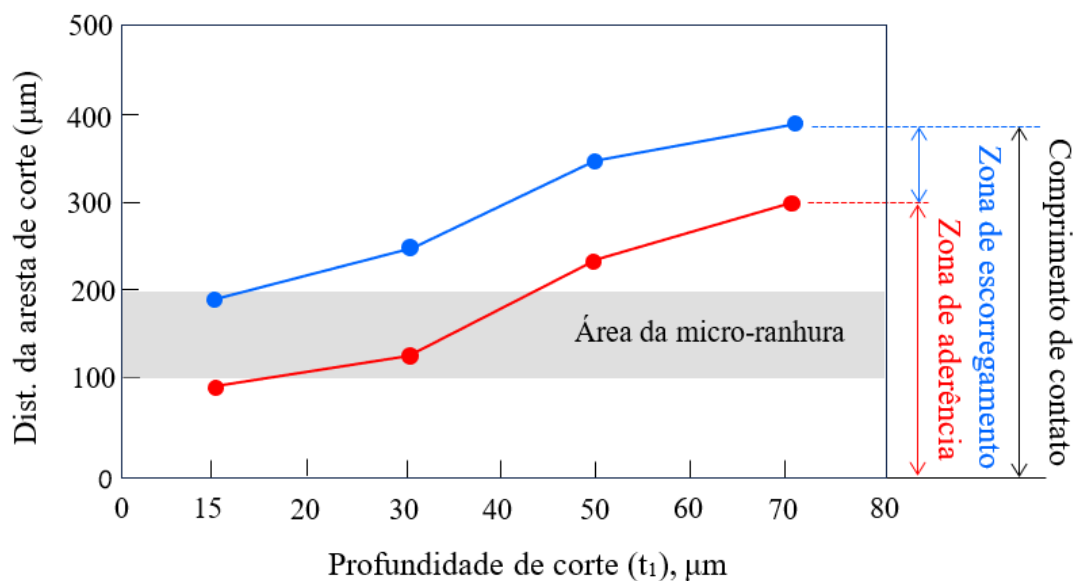


Figura 13: Posição das zonas de contato em função da espessura de cortena ferramenta convencional. Adaptado de Sugihara et al. (2021).

Na Figura 14 são apresentados os resultados dos testes em que três regiões podem ser identificadas. Na região I, as profundidades de corte de 15 e 30 μm se mostraram relativamente pequenas, pois produziram zonas de aderência que alcançaram pouco, ou nem chegaram a

alcançar, a microrranhura. Neste caso, as forças medidas na ferramenta convencional e com ranhura foram próximas, uma vez que a ferramenta com microrranhura se comportou como uma ferramenta convencional. Na Região II, a espessura de corte maior, de 50 μm , fez com que a área de contato aparente ultrapassasse ligeiramente a área da ranhura, tendo a área de contato real diminuída. Desta forma, as forças na ferramenta de corte com ranhura foram menores em relação à ferramenta convencional.

Por fim, a região III, onde $t_1 = 75 \mu\text{m}$, é aquela em que a área de contato ultrapassou totalmente a região da ranhura, fazendo com que a zona de aderência crescesse em relação à espessura de corte anterior ($t_1 = 50 \mu\text{m}$). No entanto, as forças aumentam não apenas pelo crescimento da área de aderência, mas também pelo surgimento do chamado corte derivativo ou secundário. Este corte adicional ocorre na porção inferior do cavaco pela aresta posterior da microrranhura, conforme ilustrado na Figura 15, tendo seu surgimento em condições mais severas de usinagem e/ou projeto inadequado da microrranhura.

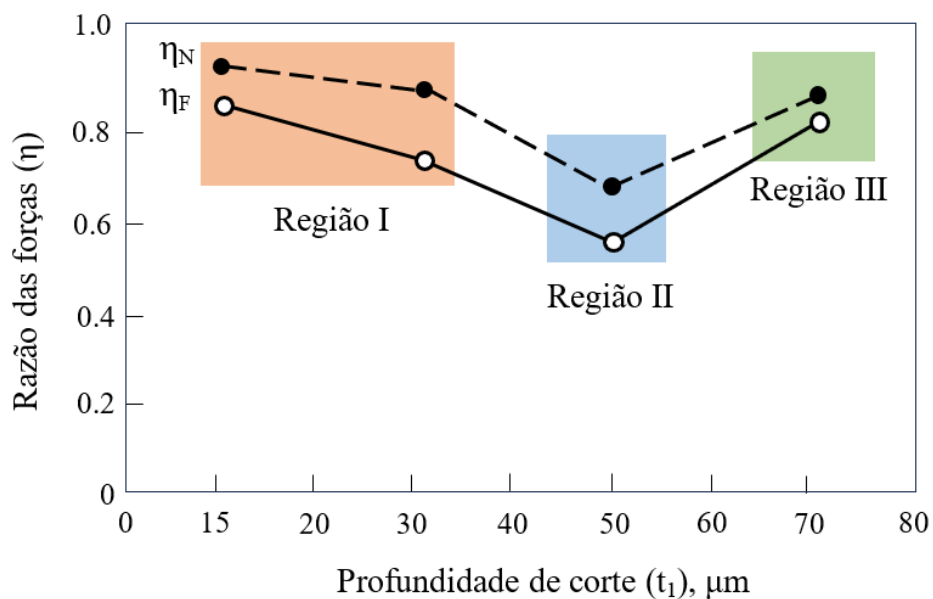


Figura 14: Razões η_F e η_N em função da espessura de corte . Adaptado de Sugihara et al. (2021).

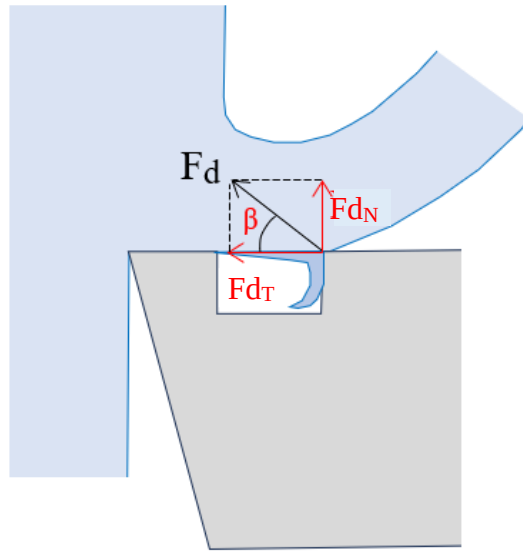


Figura 15: Representação do corte derivativo pela aresta da microrranhura. Adaptado de Sugihara et al. (2021).

Nota-se no trabalho de Sugihara et al. (2021) que a avaliação das condições tribológicas foram similares aos estudos sobre ferramentas de corte restrito e ferramentas com ranhura, conduzidos até meados da década de 80, mas ocorridos majoritariamente durante a década de 60.

Segundo Kishawy (2021) o preenchimento das microrranhuras com microcavacos, produzidos pelo corte derivativo, as tornam não apenas sem função, mas traz como consequência o aumento na força de usinagem e temperatura da ferramenta de corte. Com esta preocupação, esses autores estipularam e testaram quatro distintas formas de seção de microrranhuras: retangular; semicircular; em “v”; e em “v com o lado anterior reto”. Cada forma foi posicionada em quatro diferentes distâncias da aresta de corte: 50; 100; 150; e 200 μm . O número de microrranhuras (n_r) e a distância entre elas (l_3) foram definidas tendo como premissas o comprimento total das microrranhuras de 240 μm e a distância da última delas à aresta de corte de 510 μm . Assim, depreende-se que a partir da escolha dos valores da distância entre a primeira microrranhura e a aresta de corte (l_1) e sua largura (l_2) pode-se obter as demais características geométricas (n_r e l_3) pelas expressões (3) e (4):

$$n_r = \frac{240}{l_2} \quad (3)$$

$$l_3 = \frac{270 + l_2 - l_1}{n_r - 1} \quad (4)$$

Por meio de simulação em elementos finitos, buscou-se avaliar a força de usinagem (força de corte e de avanço) e temperatura no corte ortogonal de um aço SAE 1045, ferramenta revestida, ângulo de saída nulo, velocidade de corte de 120 m/min e avanço de 0,1 mm/volta. Depois, essas mesmas condições foram usadas para ensaio experimental.

Resumidamente, observou-se que qualquer tipo de microrranhura posicionada à 50 µm da aresta de corte apresentou intenso corte derivativo e seu completo preenchimento. Da mesma forma, todas as microrranhuras distantes à 100 µm apresentaram corte derivativo leve e preenchimento parcial. No caso das microrranhuras distantes à 150 µm quase não se notou corte derivativo, mas visível “ploughing” (deformação sem corte). Por último, as microrranhuras posicionadas mais distantes, à 200 µm, apresentaram somente “ploughing” leve. Diante dos resultados simulados, os autores tomaram a pior e a melhor geometria de microrranhuras, em termos de corte derivativo, forças e temperatura, para empregá-las em testes experimentais. A Tabela 4 traz as características dimensionais das duas microrranhuras selecionadas e as correspondentes componentes da força de usinagem medidas em dinamômetro.

Tabela 4: Características da pior e melhor microrranhura

Condição	Forma	l_1 (µm)	l_2 (µm)	r_d (µm)	n_r	l_3 (µm)	Fc (N)	Ff (N)
Pior		50	30	0	8	35,7	764	422
Melhor		200	30	6	8	14,3	670	318

l_1 : distância da aresta de corte à primeira microrranhura; l_2 : largura da microrranhura; l_3 : distância entre as ranhuras; n_r : número de ranhuras; e r_d : raio da aresta da microrranhura.

Como pode-se notar pela Tabela 4, a microrranhura de pior desempenho na simulação produziu forças de corte e avanço mais intensas do que na microrranhura de melhor desempenho quando submetidas à usinagem. Também se observou, por meio de microscópio, a presença de corte derivativo, fazendo com que, pelo menos, as duas primeiras microrranhuras da pior condição fossem totalmente preenchidas, as quais apresentaram aspecto ainda mais severo do que nas simulações. Desta forma, assim como no trabalho de Sugihara et al. (2021), constatou-se a influência, principalmente, da posição da primeira microrranhura sobre o corte derivativo. Quanto à forma, raio da aresta e profundidade das microrranhuras, Kishawy et al.

(2021) atribuíram pouca influência no desempenho da usinagem, embora não tenham conduzido testes experimentais com este objetivo.

A questão do efeito adverso do corte derivativo tem em Duan et al. (2017) os precursores, os quais em sequência publicaram outros quatro artigos sobre o mesmo assunto (DUAN et al., 2018, 2018, 2019; DUAN; WANG; XING, 2022). Para isso, os autores produziram, por meio de laser (Nd/YAG), uma única microrranhura distante 150 μm da aresta de corte, cuja seção resultou na forma aproximada de “v” com largura de 50 μm e profundidade de 13 μm . Diferente dos demais trabalhos até aqui relatados, em vez do corte do ortogonal, empregou-se o corte oblíquo ($\chi = 45^\circ$), ferramenta de metal duro com ângulo de saída de -5° , inclinação nula, velocidade de corte de 100 m/min, avanço de 0,1 mm/volta, espessura de corte de 0,5 mm, no corte de um aço AISI 1045 por 4 minutos.

Resumidamente, foi encontrado que as condições de corte melhoraram sensivelmente após a primeira metade do tempo de usinagem, ou seja, depois de transcorridos 2 minutos. Visualmente, notou-se a presença do corte derivativo no primeiro período, uma vez que se constatou o preenchimento da microrranhura e adesão de considerável volume de material do cavaco na região contígua à aresta posterior. De fato, neste intervalo de tempo, a força de corte na ferramenta com microrranhura foi superior à ferramenta convencional. Tal comportamento da força pode ser devido tanto ao incremento do corte derivativo quanto à resistência ao cisalhamento aumentada pela camada de material aderida, que tem alta afinidade com o material do cavaco. Além disso, a medida de micro dureza na parte inferior dos cavacos revelou valores mais elevados naqueles gerados pela ferramenta com microrranhura do que naqueles pela ferramenta convencional, ou seja, foram formados cavacos com maior encruamento ocasionado pela ação do corte derivativo.

Com o prosseguimento da usinagem, adentrando em sua segunda metade, verificou-se que o efeito do corte derivativo foi mitigado, sendo observado o preenchimento apenas parcial da microrranhura e a diminuição de material aderido em suas imediações. Nesta parte dos testes, a força de corte na ferramenta com microrranhura passou a ser menor do que na ferramenta convencional. Segundo Duan et al. (2017), as condições de usinagem foram favorecidas em virtude do progressivo desgaste da aresta posterior da microrranhura, a qual é responsável pelo corte derivativo, fazendo com que o seu raio aumentasse para cerca de 30 μm , frente aos 3,3 μm originais medido no início dos testes. Conforme os autores sustentam, esse significativo arredondamento torna o ângulo de saída da aresta da microrranhura altamente negativo inibindo o corte em detrimento do “ploughing”, o qual é caracterizado por deformações elástica e

plástica sem que haja remoção de material. Nesta fase o efeito de tamanho (*size effect*) ganha escala impondo um valor para a espessura indeformada mínima do cavaco derivativo (t_{dm}) que atinge as proporções da microrranhura, podendo alcançar ou até mesmo ultrapassar a profundidade da microrranhura, sendo por isso inibida sua formação. A Figura 16 retrata, esquematicamente, a formação do cavaco derivativo, ou apenas quando há “*ploughing*”, onde A é o ponto de estagnação, θ o ângulo de estagnação, t_d a espessura indeformada do cavaco e t_{dm} a espessura indeformada mínima do cavaco derivativo abaixo do qual não há corte, mas sim “*ploughing*” ou deslizamento. As expressões (5) e (6) propostas por Son et al. (2005), voltadas originalmente ao microcorte, permitem encontrar o valor de t_{dm} , sendo β o ângulo de atrito na microrranhura (Figura 15), cujo valor os autores assumem ser aproximadamente o mesmo daquele da superfície de saída no corte com ferramenta convencional.

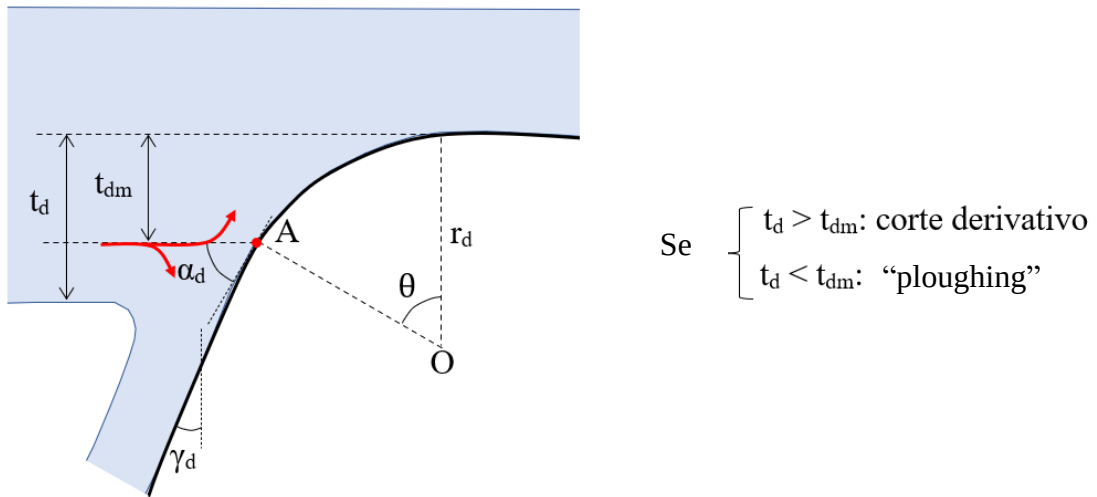


Figura 16: Representação da espessura indeformada mínima do cavaco derivativo (t_{dm}) (adaptado de Son et al. 2005 e Duan et al., 2018a).

$$t_{dm} = r_d(1 - \cos\theta) \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \quad (6)$$

É interessante notar que Duan et al. (2017) não estabelece nenhum critério para posicionar a microrranhura em relação à aresta de corte, distante 150 μm , desconsiderando essa variável. Porém, desde os estudos com ferramenta de contato restrito, sabe-se que o controle do comprimento da zona de contato cavaco/ferramenta, e fundamentalmente da zona de aderência, governa o processo de usinagem.

No entanto, em trabalho subsequente, Duan et al. (2018a) procura predizer o valor da espessura indeformada do cavaco derivativo (t_d) e sua correspondente espessura mínima (t_{dm}), primeiro em função da distância da microrranhura à aresta de corte, depois em função da largura da microrranhura e raio de sua aresta sob diferentes velocidades de corte. Para tanto, os autores empregam a teoria da plasticidade que, associada à teoria do microcorte, permite calcular a deformação/deslocamento do cavaco no interior da microrranhura. Antes, porém, foi necessário estimar tanto a distribuição de tensões na interface cavaco/ferramenta, conseguido pelo modelo de Johnson-Cook, quanto o ângulo de atrito, encontrado pelo princípio de mínima energia de Oxley (OXLEY, 1989).

Além do modelamento, os autores conduziram alguns testes para validar os resultados, embora apenas a posição da microrranhura tenha sido contemplada. O material usado foi o aço AISI 1045, cujas constantes e parâmetros para implementação do modelo de Johnson-Cook são fartamente disponíveis na literatura. A ferramenta de corte foi de aço rápido com ângulo de saída e inclinação nulos e ângulo de folga de 7°. Uma única microrranhura foi produzida por laser (Nd/YAG), resultando em forma aproximada de “v”, com 50 μm de largura, 35 μm de profundidade e raio de aresta com cerca de 5 μm . As distâncias da microrranhura à aresta de corte foram: 150; 200; 250; 300; e 350 μm . A velocidade de corte foi de 90 m/min e o avanço de 0,1 mm/volta em operação de torneamento ortogonal. Infelizmente, o tempo de usinagem não foi informado.

A primeira predição, a qual pôde ser confrontada com resultados experimentais, consistiu na determinação das espessuras indeformadas do cavaco derivativo (t_d) e sua correspondente espessura mínima (t_{dm}) em função da distância da microrranhura à aresta de corte. Enquanto a espessura mínima se mostrou constante, em aproximadamente 0,213 μm , independentemente da posição da microrranhura, a espessura indeformada do cavaco derivativo diminuiu de maneira praticamente linear com o aumento da distância, passando sucessivamente de 0,267 para 0,250; 0,235; 0,220 e 0,203 μm . A diferença entre os valores dessas espessuras ($\Delta = t_d - t_{dm}$) em cada posição da microrranhura indica a formação de cavaco, se positiva, ou “ploughing”, se negativa, conforme representação da Figura 17.

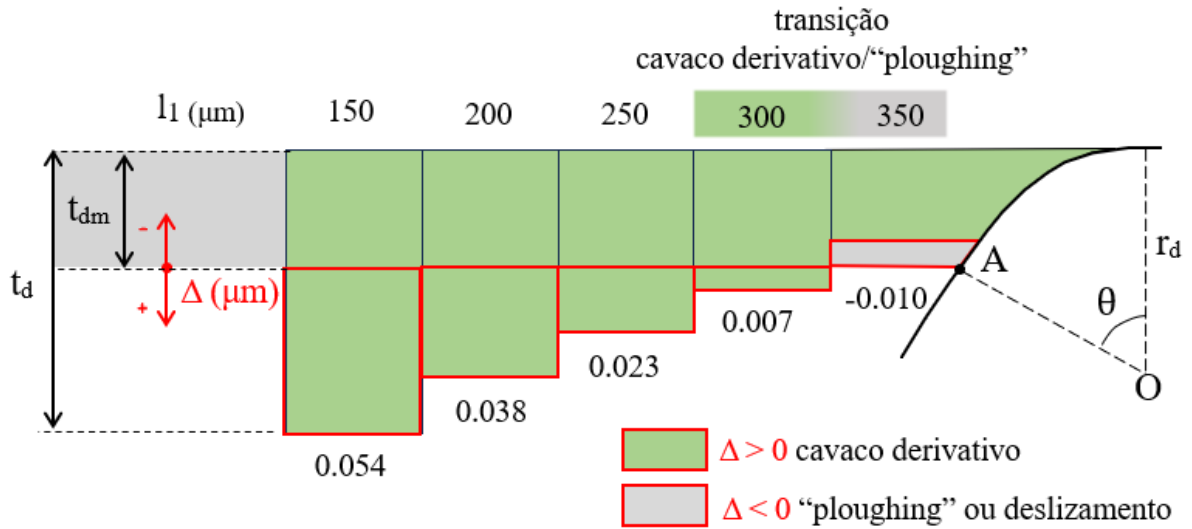


Figura 17: Predição de cavaco derivativo ou "ploughing" para diferentes distâncias da microrranhura à aresta de corte (l_1) (Adaptado de Duan et al., 2018a).

Em relação aos experimentos, imagens das microrranhuras distantes 150, 200 e 250 μm da aresta de corte revelaram os seus completos preenchimentos com cavaco derivativo. A microrranhura à 300 μm também aparentou preenchimento, porém de menor intensidade que as demais. A última delas, à 350 μm , ainda que tenha apresentado leve corte derivativo, se caracterizou pela adesão de material do cavaco na aresta posterior, o que segundo Duan et al. (2018a) seria indicação de formação de aresta postiça. Como consequência, a espessura mínima necessária à formação do corte derivativo (t_{dm}) é aumentada ao ponto de favorecer amplamente o "ploughing". Os autores ressaltam que vestígios do corte derivativo e "ploughing" foram deixados na superfície inferior dos cavacos quando passaram pelas microrranhuras posicionadas à 300 e 350 μm da aresta de corte, respectivamente, conforme sugerem as imagens exibidas na Figura 18. Deste modo, o modelo proposto pelos autores tendeu a convergir para os resultados experimentais.

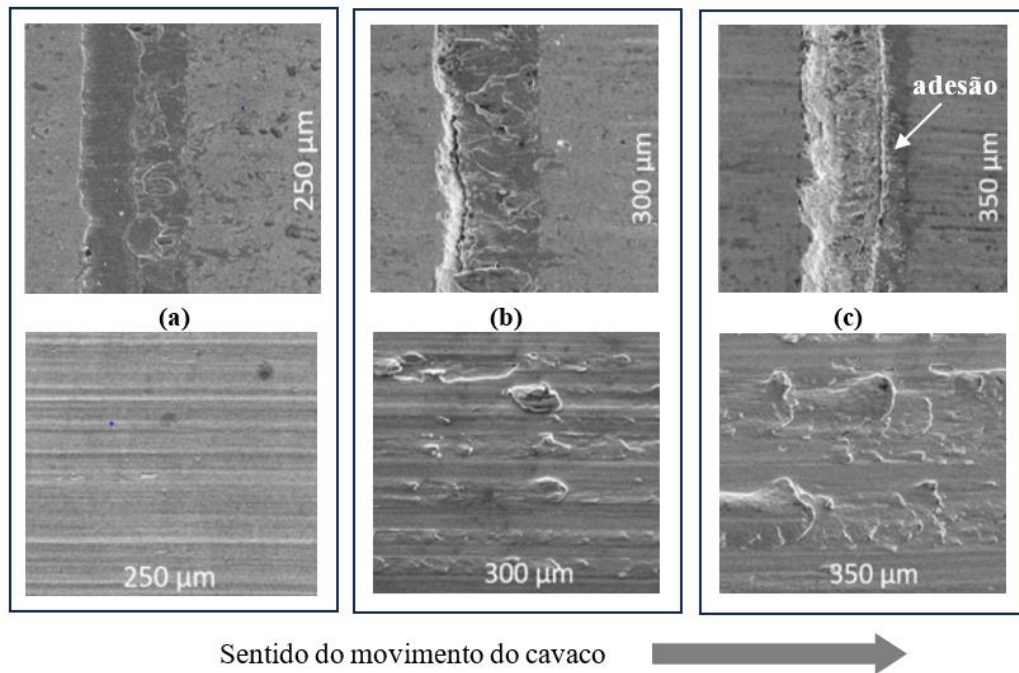


Figura 18: Microrranhuras à diferentes distâncias da aresta de corte e seus cavacos: (a) 250 μm ; (b) 300 μm ; e (c) 350 μm .

Continuando a explorar o modelo desenvolvido, mas agora sem validação experimental, Duan et al. (2018a) estimam a espessura indeformada do cavaco derivativo (t_d) para microrranhura com diferentes larguras, unicamente posicionada à 150 μm , sob três velocidades de corte distintas: 90; 180; e 240 m/min. De um modo geral, sabe-se que o aumento da velocidade de corte eleva a taxa de deformação e, conseqüentemente, a temperatura na interface cavaco-ferramenta. Esses fatores aumentam a susceptibilidade do cavaco à deformação plástica favorecendo os mecanismos associados ao “*ploughing*”, fazendo com que a espessura indeformada mínima (t_{dm}), necessária para iniciar o corte derivativo, tenha que aumentar. Ao mesmo tempo, a espessura indeformada do cavaco derivativo (t_d) acompanha esse aumento. O aumento da largura da microrranhura também causa aumento da espessura do cavaco derivativo, conforme é mostrado na Figura 19. Este resultado, embora os autores não tenham discutido, deve-se ao tipo de modelo proposto por eles, o qual incorpora os efeitos da tensão normal variavelmente distribuída sobre o cavaco, sendo tratado como uma estrutura carregada. A deflexão dessa estrutura é a espessura indeformada do cavaco, portanto assumindo valores crescentes à medida que seu comprimento (l_2), isto é, a largura da microrranhura, aumenta.

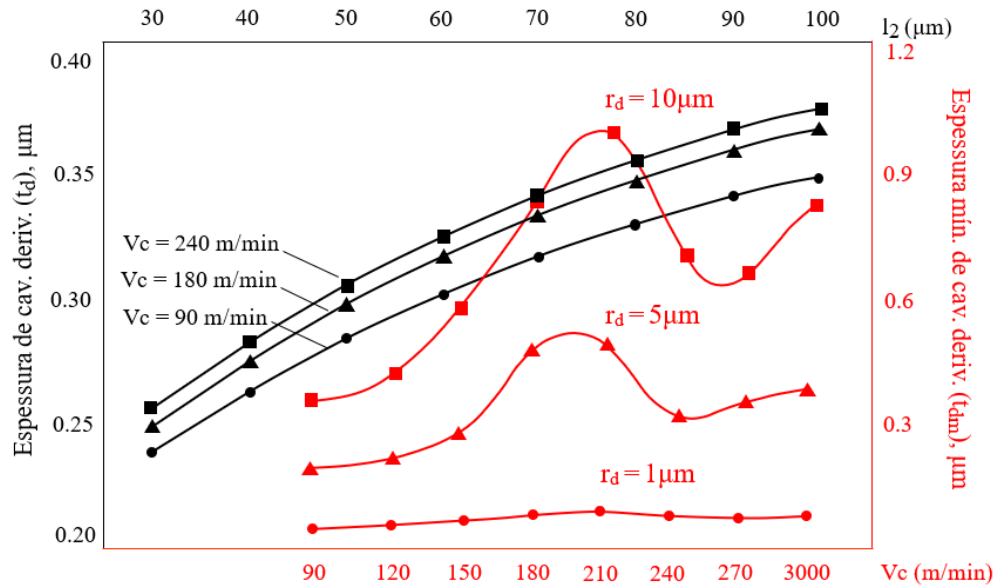


Figura 19: Espessura indeformada do cavaco derivativo (t_d) e espessura mínima (t_{dm}) em funções da largura (l_2) e raio da aresta (r_d) sob diferentes velocidades de corte.

Quanto a influência do raio da aresta da microrranhura, o seu aumento torna a espessura mínima indeformada do cavaco derivativo maior, conforme previsto pela expressão (6). A velocidade de corte crescente, acompanhada da elevação da temperatura, também produz aumento da espessura mínima até alcançar um valor máximo em torno de 210 m/min, como se observa na Figura 19. Depois, entre 210 e 240 m/min, a espessura mínima diminui. Esta queda é creditada, pelos autores, ao envelhecimento por deformação dinâmica, fenômeno conhecido por fragilidade azul (*blue brittleness*), em alusão à coloração do filme de óxido que se forma na superfície de determinadas ligas sujeitas ao aquecimento. Jirandehi et al. (2022) descreve este fenômeno como sendo um mecanismo cujo aumento simultâneo de temperatura e carregamento mecânico, ou apenas temperatura, inicia um aumento da difusão de átomos de certos elementos, como o carbono e o nitrogênio, que migram para as proximidades das discordâncias. Como consequência, o limite de escoamento do material aumenta, reduzindo sua ductilidade. Uma vez ultrapassada a faixa de temperatura em que este fenômeno ocorre, o material readquire suas propriedades mecânicas e a espessura mínima indeformada do cavaco volta a crescer com o aumento da temperatura, ou seja, com a velocidade de corte.

No artigo seguinte, Duan et al. (2018b) na tentativa de estimar a força de usinagem, bem como sua parcela devido à força derivativa, produzida por uma microrranhura posicionada à determinada distância da aresta de corte, empregam diversos modelos disponíveis na literatura.

O modelo que serve de arcabouço ao estudo é o clássico modelo de Oxley (1989), criado para determinar a força de usinagem. Em um segundo momento, porém, os autores o modificam para que o corte derivativo, e sua influência sobre a temperatura, fosse levado em consideração. Perseguindo este objetivo, as tensões de escoamento na zona primária e secundária de cisalhamento foram estimadas por meio do modelo de Johnson e Cook (1983) o qual tem como uma das variáveis de entrada a temperatura de usinagem. Para alimentar esse modelo, o método da fonte de calor, de Jaeger (JAEGER, 1942), foi aplicado ao corte derivativo. Porém, o corte derivativo tem uma componente de força associada ao “*ploughing*”, surgida mesmo quando o cavaco não é formado na microrranhura, mas deformado na sua aresta posterior. Essa particularidade é tratada pelo modelo de Waldorf et al. (1998) em combinação com a teoria de Jawahir (1986), em que o primeiro aborda o efeito de tamanho enquanto o segundo aponta para a espessura indeformada do cavaco derivativo (t_d), a partir da direção da trajetória do cavaco na saída de ferramentas de contato restrito. A sequência de informações entre os diversos modelos utilizados e a iteração entre eles é esquematicamente sumarizada no fluxograma da Figura 20.

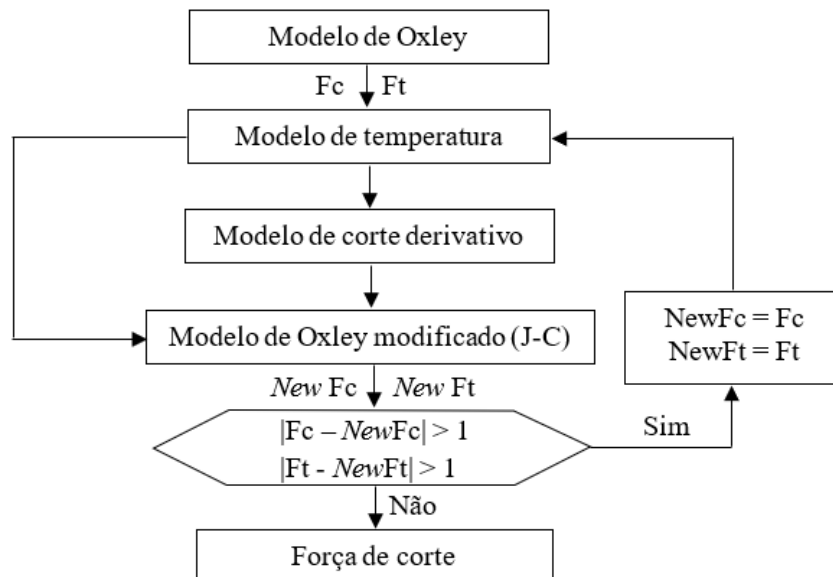


Figura 20: Fluxograma do cálculo para predição da força de usinagem (Duan et al., 2018b).

Uma vez estabelecido o modelo para predição das forças de usinagem, que contempla o corte derivativo, Duan et al. (2018b) procedeu a comparação com valores medidos em ensaios, em que se empregou o corte ortogonal de um aço AISI 1045 sob duas velocidades, 100 e 180

m/min, avanço de 0,1 mm/volta e distância da microrranhura à aresta de corte de 150, 200, 250, 300 e 350 μm . A microrranhura obtida com laser Nd/YAG aproximou-se da forma em “v”, com profundidade de cerca de 30 μm , largura de 40 μm , raio da aresta de 5 μm e ângulo de saída de -40° . Por meio de observação microscópica, constatou-se que, sob velocidade de corte de 100 m/min, ocorreu corte derivativo em todas as posições das microrranhuras com preenchimento total delas, mas sem que os autores tenham mencionado testes sob velocidade de corte maior, de 180 m/min.

Dando prosseguimento aos testes, agora também com a velocidade de corte de 180 m/min, Duan et al. (2018b) ressaltaram a boa concordância entre os valores medidos e simulados da força de usinagem, embora possa ser notado que o erro médio entre eles foi de aproximadamente 12,5%. Convencidos do sucesso do modelo, passaram a observar o comportamento da força de usinagem, incluído nela a força derivativa, em diferentes velocidades de corte, tanto em ferramenta convencional quanto com microrranhura, posicionada a 150 μm da aresta de corte. Analogamente, realizou-se a simulação isolada da força derivativa. Em seguida, levantou-se o comportamento da força derivativa em função do tamanho do raio da aresta posterior da microrranhura. Os resultados das mencionadas simulações são apresentados na Figura 21.

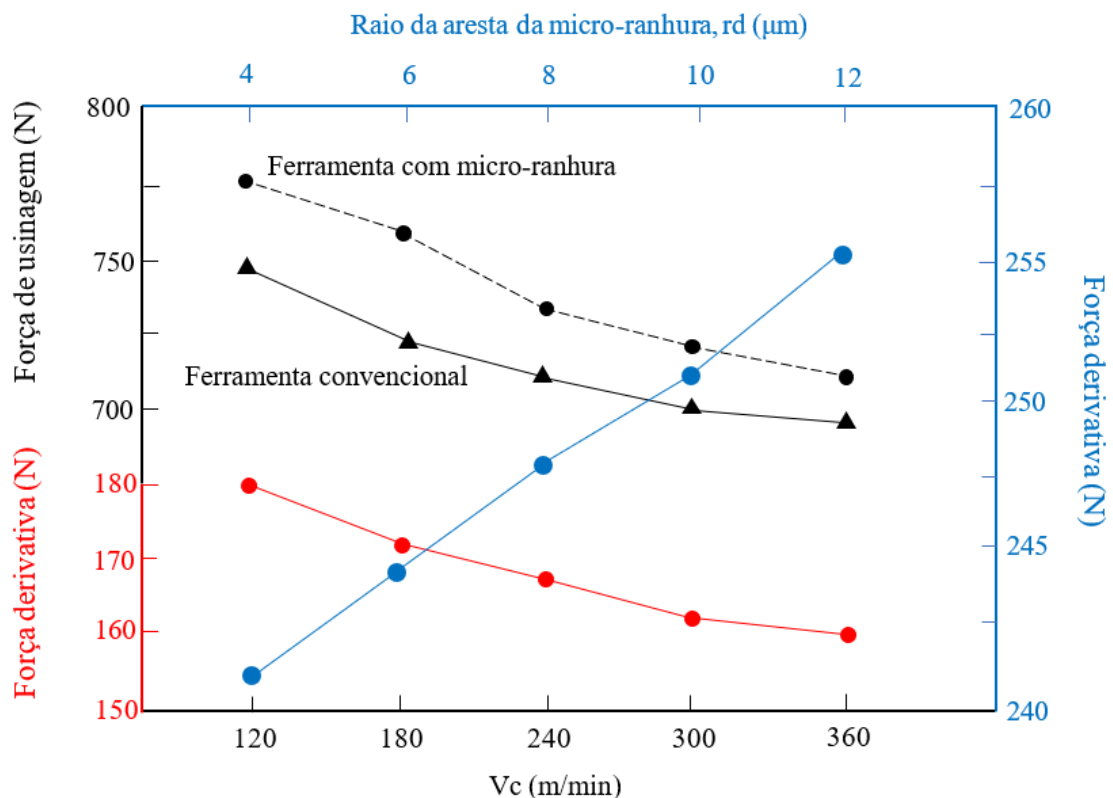


Figura 21: Simulações das forças de usinagem e derivativa sob diferentes velocidades e raios da aresta da microrranhura (Adaptado de Duan et. al, 2018b).

Antes de analisar os resultados simulados, dispostos na Figura 21, observa-se que, sob as mesmas condições de ensaio, a força de usinagem na ferramenta com microrranhura, que tem como uma das componentes de formação a força derivativa, está longe de ser a composição da força de usinagem na ferramenta convencional e a força derivativa, que foi isoladamente simulada. Porém, tal importante inconsistência, diga-se, não foi trazida à discussão pelos autores.

Mesmo diante da possível imprecisão dos resultados, é possível observar no gráfico da Figura 21 a diminuição das forças de usinagem e derivativa à medida que a velocidade de corte aumenta. Os autores atribuem esse comportamento ao “amolecimento térmico” do material do cavaco gerado pelo crescente aumento da temperatura com a velocidade, resultado que é amplamente aceito pela literatura e muito bem relatado por Shaw (2005).

Quanto ao efeito do aumento do raio da microrranhura sobre a força derivativa, que majora esta última, Duan et al. (2018b) sustenta que sobre a região da aresta posterior se forma uma aresta postiça estável cuja extensão é tanto maior quanto maior o raio da aresta da microrranhura. Como consequência do aumento dessa área de material aderida tem-se o

aumento da força de adesão entre o cavaco e a ferramenta. Esta mesma observação já havia sido feita por Duan et al. (2018a), utilizando a Figura 18a para comprovar seu argumento. Porém, novamente, cabe uma ressalva, uma vez que Duan et al. (2017) e Duan et al. (2018a), nos seus trabalhos, defenderam que o aumento do raio da aresta da microrranhura causa minimização do corte derivativo, em razão do efeito de tamanho, promovendo o “*ploughing*” que, segundo os autores, mitiga a força derivativa. Em Duan et al. (2017), os autores, inclusive, destacaram o efeito benéfico do desgaste da aresta da microrranhura, que causa o crescimento do seu raio, na eliminação do corte derivativo, como pode ser revisitado nas páginas anteriores.

Finalizando os resultados de Duan et al. (2018b), a força derivativa em função do ângulo de saída da microrranhura também foi predita, quando se emprega uma microrranhura à 150 μm da aresta de corte, raio de 5 μm e velocidade de corte de 100 m/min. Com este propósito, os autores relataram ter usado a teoria de corte em ferramenta convencional, sem que tenham dado detalhes. Provavelmente adotaram o modelo de Oxley, mas estimando a espessura indeformado do cavaco (t_d) por meio de relações geométricas envolvendo a direção do cavaco no interior da microrranhura e a sua largura, i. e., onde se localiza a aresta posterior. Para isso, devem ter recorrido ao trabalho de Jawahir (1986), de onde é estimado o valor do ângulo da trajetória do cavaco (η) imediatamente após ele perder o contato com a superfície de saída de uma ferramenta de contato restrito. Diante de tal simplificação, porque não considera o efeito de tamanho (e mesmo que considerasse, esta teoria não se estende para além do raio da aresta de corte, ou seja, não contempla a superfície de folga), encontra-se que a força derivativa diminui à medida que o ângulo de saída se torna menos negativo. Como notado, estes resultados carecem de maior estudo, mesmo porque Kishawy et al. (2021) não identificaram a influência da forma da microrranhura na força de usinagem quando diferentes geometrias (quadrada; semicircular; em “v”; e em “v com o lado anterior reto”) foram empregadas.

Na mesma direção que Duan et al. (2018a e 2018b), Kishawy et al. (2022) desenvolve um modelo iterativo que ao final de seu processamento entrega uma configuração de microrranhura(s) otimizada, estabelecendo os valores da distância da primeira microrranhura à aresta de corte (l_1), número de microrranhuras (n) e distância entre elas (l_3). Basicamente, todo o processo é composto de três módulos. O primeiro deles fornece o comprimento de contato cavaco-ferramenta, as tensões sobre a ferramenta e o ângulo de atrito, considerando-se uma ferramenta convencional, a partir das informações das condições de usinagem, geometria da ferramenta de corte, material da peça e raio da aresta da microrranhura. A parte principal deste

módulo, que permite encontrar as tensões, emprega o modelo de Johnson-Cook acoplado à teoria de Oxley.

No segundo módulo, de posse da distribuição de tensões, os autores assumem que o cavaco, ao longo do espaço da microrranhura, se comporta como uma viga simplesmente engastada sob tensões uniformemente variáveis. O valor do deslocamento do cavaco (viga) em sua extremidade livre é a espessura indeformada do cavaco derivativo (t_d). Evidentemente, se trata de uma simplificação, cuja validade deve ser posteriormente confirmada em experimento. Assim como em Duan et al. (2018a), a espessura mínima do cavaco derivativo (t_{dm}) é encontrada por meio das expressões (5) e (6). A partir desses pressupostos, o módulo atribui valores de l_1 em pequenos incrementos verificando sua viabilidade, isto é, selecionando as posições da primeira microrranhura em que não há corte derivativo ($t_d < t_{dm}$). Uma vez encontrada a distância limite, o módulo sugere diferentes agrupamentos de microrranhuras, indo de apenas uma a três.

No terceiro e último módulo, os agrupamentos de microrranhuras são testados quanto ao comprimento de contato total cavaco-ferramenta (l_t) que cada um produz, sendo, então, eleito o agrupamento que produz o menor l_t .

Por fim, para validar o modelo proposto, Kirshawy et al. (2022) procederam um corte ortogonal em tubo de aço AISI 1045 de 30 mm de diâmetro, espessura da parede de 1 mm, sob velocidade de corte de 120m/min e avanço de 0,09 mm/volta, com ferramenta de metal duro com ângulo de saída de 6°, em cuja superfície foram feitas as microrranhuras com laser Nd/YAG em forma aproximada de “v”. Quando o modelo proposto foi adequadamente alimentado, informando a ele o raio da aresta da microrranhura de 6 μ m, o valor de l_1 foi de 160 μ m com $l_2=60$ μ m e $l_3=45$ μ m para um conjunto composto por 3 microrranhuras, cujo comprimento de contato cavaco-ferramenta compreendeu 0,432 mm. Como resposta, a força de corte foi de 373,2 N e a força de avanço de 220,6 N, não se observando corte derivativo, ao passo que a usinagem com ferramenta convencional apresentou uma força de corte de 399,2 N e força de avanço de 256,5 N, ou seja, reduções de 6,5 e 14% respectivamente.

Na sequência de publicações de Duan, na última delas, Duan et al. (2022), os autores exploram a aplicação de microrranhuras na presença de fluido de corte, propondo um novo tipo de microrranhura, a qual denominaram textura em multiescala. Comparada com a ferramenta com microrranhura até então estudada, a principal diferença reside na confecção de uma região com aproximadamente 1 mm de largura por 0,43 mm de comprimento, posicionada a 300 μ m

da aresta de corte, estando toda a região rebaixada em 9,38 μm . Após o rebaixamento feito com laser femtosegundo, foram fabricadas microrranhuras dentro dessa região, com profundidade de 9,5 μm e largura de 50 μm , equidistantes à 70 μm entre si. Esta ferramenta foi comparada uma ferramenta com microrranhuras com as mesmas dimensões, mas sem o rebaixamento da superfície de saída e com maior profundidade das microrranhuras, de 17,5 μm .

Tendo sido produzidas 4 microrranhuras em cada ferramenta de óxido de alumínio com carbeto de titânio, foram usinados corpos de prova em aço AISI H13, sob método de lubrificação convencional, com velocidades de corte de 80 a 249 m/min e avanço de 0,36 mm/volta. Apesar do aumento do desgaste da ferramenta devido à maior temperatura, atingida sob a velocidade de corte mais elevada, as ferramentas multiescala puderam reduzir as temperaturas, forças de corte e prolongar a vida da ferramenta em comparação à ferramenta com microrranhuras sem rebaixamento. Apesar de Duan et al. (2022) não terem comparado com ferramenta de corte convencional, os autores se apoiaram em Duan et al. (2018a) para indicarem que a ferramenta de corte multiescala pode reduzir a espessura de cavaco indeformado (t_d) dentro da microrranhura. Em complemento, os autores apresentaram análises por EDS que mostraram maior incidência de resíduos de fluido de corte, no caso sódio, no interior das microrranhuras da ferramenta multiescala, apontando sua maior capacidade lubrificantes. Ainda citam que a ferramenta multiescala pode reduzir o contato com o cavaco de modo a se assemelhar com uma ferramenta de contato restrito.

As texturas não influenciam apenas os aspectos tribológicos, mas por meio delas a troca térmica por convecção é aumentada, uma vez que uma microrranhura pode ser assumida como uma aleta estendida de seção transversal uniforme. Ademais, segundo Arulkirubaraban (2016), a diminuição da área de contato cavaco/ferramenta diminui o calor conduzido à ferramenta, reduzindo sua temperatura entre 17 e 23%. No caso da aplicação de fluido de corte, a expansão térmica faz com ele saia das ranhuras e forme um filme mitigando o atrito (Duan et al., 2018). Sendo Jäger et al. (2016), a transferência de calor também é mais eficaz devido à maior área de troca térmica e reduções das barreiras de vapor geradas pela maior turbulência local.

A fim de aumentar ainda mais o desempenho das ferramentas texturizadas com vista à abolição do uso de fluido de corte, lubrificantes sólidos embutidos dentro das texturas têm sido usados, tais como dissulfeto de molibdênio, MoS_2 (DENG et al., 2011) dissulfeto de tungstênio, WS_2 (ZE et al., 2012), fluoreto de cálcio, CaF_2 e grafite (ZHOU et al., 2022). Durante a usinagem, aos poucos o lubrificante é espalhado na interface cavaco/ferramenta formando um

filme com baixa resistência ao cisalhamento, resultando na redução do atrito, tal como observaram Jianxin et. al (2012) e Deng et al. (2011).

Recentemente, em um trabalho desenvolvido no Laboratório de Tecnologia da Usinagem (LATUS), da Unesp - câmpus Bauru - SP, Ribeiro et al. (2024) avaliaram ferramentas de corte com microrranhuras preenchidas com nanotubos de carbono. Neste trabalho, os autores demonstraram o bom desempenho das ferramentas de corte com microrranhuras preenchidas com nanotubos de carbono quanto à redução de forças, atrito, temperatura e aumento da vida da ferramenta. Tais resultados são consequência da alta capacidade de remoção do calor da região de contato cavaco/ferramenta, visto que os nanotubos de carbono apresentam condutividade térmica extremamente alta, que varia entre 1000 e 6000 W/m.K.

Por meio de simulações em *software*, os autores puderam determinar a melhor geometria e posição das microrranhuras para o preenchimento com nanotubos de carbono em termos da maior eficiência na remoção de calor e resistência mecânica para suportar as forças na usinagem. No entanto, pôde-se constatar a ocorrência de corte derivativo, indicando que a geometria e posição das microrranhuras mais adequadas em função deste fenômeno ainda é uma lacuna e carece de estudos, o que torna o assunto motivador.

De fato, o projeto de microrranhuras/textura nas ferramentas de corte tem sido o principal fator limitante à aplicação em larga escala das ferramentas texturizadas, uma vez que se trata, basicamente de tarefa empírica.

2.3 ÁREA DE CONTATO ENTRE CAVACO E FERRAMENTA

O contato entre o cavaco e a ferramenta é governado por mecanismos de adesão e deslizamento, os quais estão delimitados em áreas onde cada um desses mecanismos predominam, sendo amplamente estudado na literatura, principalmente pelos autores clássicos, como Shaw (2005) e Trent e Wright (2000). Neste aspecto, as ferramentas texturizadas/estruturadas tem como um dos seus pilares a redução do comprimento, isto é, área de contato, cavaco/ferramenta. Como ilustrado na Figura 22 por Siju et al. (2021), o cavaco, ao passar pelas microrranhuras, tem contato apenas com as regiões superiores das microrranhuras. Ampliando a discussão e baseando-se nos modelos teóricos de Duan et al. (2018a, 2018b), bem como nos modelos propostos por Kishawy et al. (2021, 2022), ao lado da redução do

comprimento de contato também estaria a capacidade de redução do corte derivativo com consequente menor entupimento das microrranhuras.

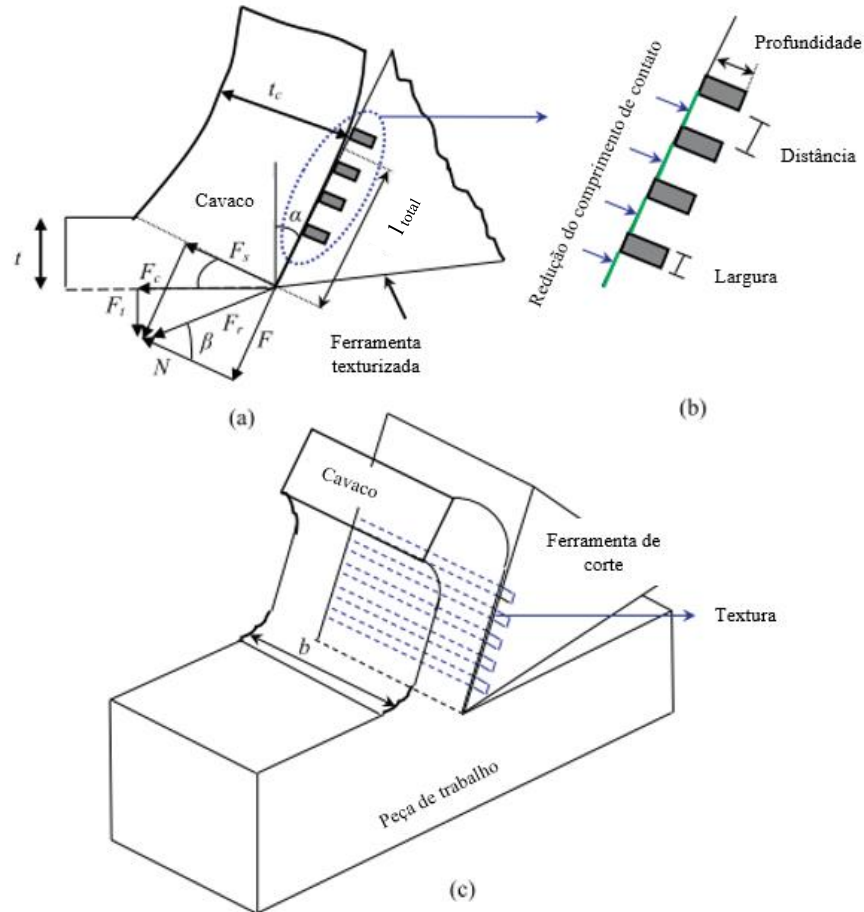


Figura 22: (a) Usinagem com ferramenta com microrranhuras; (b) visão ampliada do comprimento de contato; e (c) interface cavaco-ferramenta. Adaptado de Siju et al. (2021).

Apesar de não citar o efeito de corte derivativo, Koshy & Tovey (2011) analisaram a distância da região texturizada em relação à aresta de corte. Segundo os autores, existem duas considerações ao definir a posição da textura. A primeira é que estender a textura até a aresta de corte é contraproducente, pois isso aumenta as forças de corte devido às modificações na aresta, e que texturas nas proximidades da aresta podem diminuir a resistência mecânica da ferramenta de corte. A segunda é que observações experimentais mostraram que o ângulo de atrito é mínimo quando a distância da aresta de corte à textura é de aproximadamente 2 a 3 vezes o valor do avanço, considerando que o comprimento de contato ferramenta-cavaco é normalmente cerca de 4 a 6 vezes o avanço. Assumindo que as zonas de aderência e deslizamento tenham aproximadamente o mesmo comprimento, isso implica que é mais

adequado texturizar apenas a região de deslizamento. Essa afirmação, feita por Koshy e Tovey (2011), não vai de encontro com o trabalho de Sugihara et al. (2021), que verificam os melhores resultados para a posição da microrranhura ainda na região de aderência. Tal discrepância poderia ser atribuída ao fato de que Koshy e Tovey (2011) avaliaram seus resultados sob condições de lubrificação, enquanto Sugihara et al. (2021) usaram o corte a seco, não podendo ainda ser descartadas questões atreladas à difícil determinação das regiões de aderência e deslizamento.

Wu et al. (2020) realizaram simulações de corte ortogonal com a liga de titânio Ti-6Al-4V, utilizando parâmetros de Johnson-Cook. Nesta simulação as microrranhuras em forma retangular e em “v” foram posicionadas à 50 µm da aresta de corte, sob uma espessura de corte de 0,1 mm e velocidade de corte de 60 a 300 m/min. Para ambas as condições, Wu et al. (2020) apontam reduções no comprimento de contato por volta de 10 % em comparação à ferramenta convencional. Essa redução de contato pode ser atribuída ao menor raio de curvatura do cavaco, ocorrido em parte pelo corte derivativo. Além disso, os autores conduziram experimentos em que comprovaram a capacidade de redução de forças e temperatura na presença de microrranhuras. Além disso, os autores mencionam a maior eficiência da microrranhuras em “v” do que as retangulares, uma vez que estas apresentam corte derivativo mais severo.

Resultados experimentais mostrando as regiões de contato entre cavaco e ferramenta, permitindo que os comprimentos de contato sejam quantificados, são escassos, conforme apontam Gad, Armarego e Smith (1992) em estudo sobre o assunto. Explorando os modelos tradicionais que tratam das regiões de contato, os estudos de fotoelasticidade realizados por Takeyama e Usui (1960) representa o modelo clássico de esforços normais e cisalhantes na interface de contato (Figura 23). A tensão de cisalhamento, constante entre A-D, é determinada como a região de contato máximo entre cavaco e ferramenta, decrescendo a zero na região D-C. A tensão normal, por sua vez, apresenta um crescimento exponencial da região de mínimo contato C até a aresta de corte, representada por A.

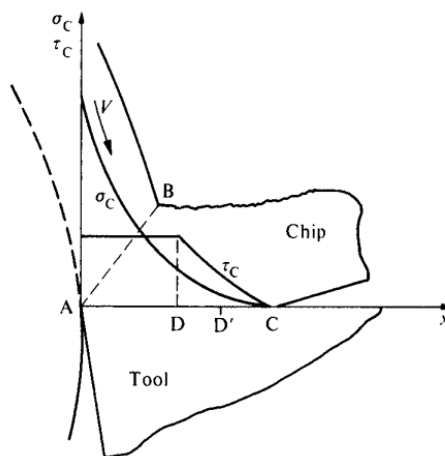


Figura 23: Tensões normais e de cisalhamento na face da ferramenta. Shaw (2005).

No entanto, a formação destas regiões pode variar em função dos materiais e condições de corte empregados. Indícios da presença de uma região de aderência podem ser determinados pela observação da impressão das características do acabamento superficial das ferramentas de corte na superfície inferior do cavaco (ZOREV, 1963).

Doyle et. al (1979) realizaram estudos com ferramentas de safira e aço rápido na usinagem de diversos materiais. Os autores determinaram experimentalmente que a zona de aderência parece ser dividida em 2 partes, enquanto a zona de deslizamento é única (Figura 24). A região de aderência (*zone 1*) é dividida em duas partes, “a” e “b”, sendo observado que as marcas de aderência e desgaste das ferramentas foram mais acentuadas na região “b”, no qual há diminuição da força normal e uma tendência à transição para a região de atrito de Coulomb. Essa região completa tem um comprimento de 2 a 3 vezes a espessura de corte. Após essa região (*zone 2*), a superfície recém-formada do cavaco tem contato com a atmosfera, culminando na formação de óxidos e condições que aumentam as forças de usinagem e o desgaste da ferramenta.

Recobrando a ferramenta de safira com uma camada de cobre, foi observado que na zona 1ª essa camada foi preservada em um comprimento de 1,5 a espessura de corte, enquanto a camada foi rapidamente removida na zona b. Os autores realizaram novos experimentos na usinagem de alumínio e cobre, com ferramentas de aço rápido retificadas e não polidas. Na zona 1a, o acabamento da retificação é reproduzido fielmente e sem distorções. Na zona 1b, as impressões das ranhuras de retificação tornam-se cada vez mais distorcidas com o aumento da distância, indicando aumento da tensão normal superficial à medida que o cavaco passa pela zona 1b.

A zona 2 é uma região na qual a superfície recém-formada do cavaco não mais sofrerá alterações. Se o oxigênio estiver disponível em quantidade suficiente, sob essas condições, isso levará ao aumento da adesão e do atrito, com consequente elevação da força de usinagem (DOYLE; HORNE; TABOR, 1979).

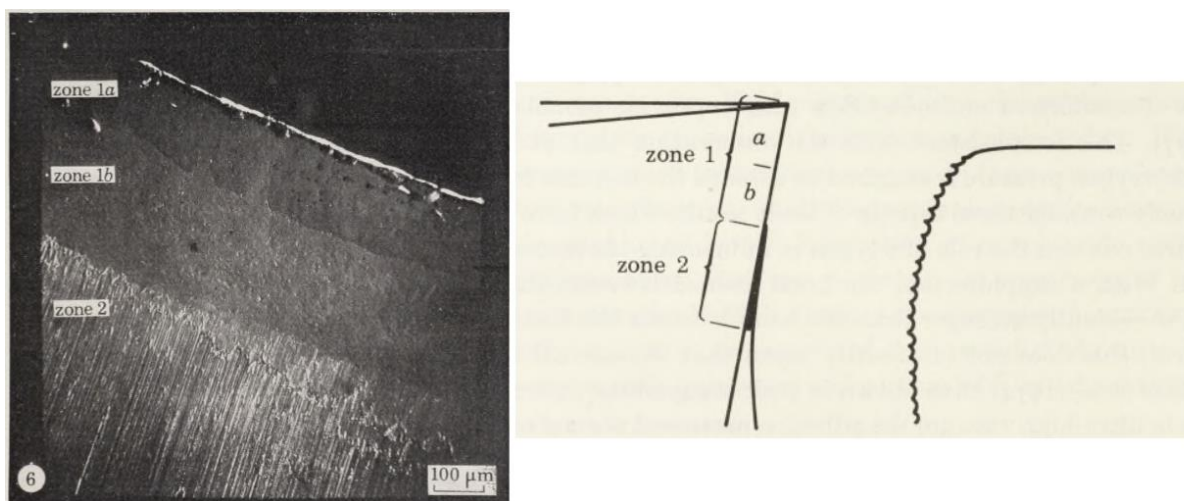


Figura 24: Regiões de aderência e deslizamento. Adaptado de Doyle et al. (1979).

Diante dos experimentos conduzidos em outro trabalho, Doyle e Horne (1980) encontraram que a zona 2 pode ser suprimida durante a usinagem na ausência de oxigênio, levando à mitigação da força tangente à superfície de saída da ferramenta de corte. Wright, (1981) cita que essa foi inesperada, uma vez que se assumia, até então, que as maiores condições de atrito estavam relacionadas à região mais próxima a aresta de corte. Dessa forma, o conceito do escoamento do cavaco está ligado a uma região quase estacionária próxima da aresta de corte, existindo um movimento relativo no restante da porção do cavaco.

Em testes com maiores variações de velocidades de corte, materiais de ferramenta e tipos de corpos de prova, Wright (1981) mostra que as regiões da zona 1 e zona 2 podem ser modificadas de acordo com a combinação do material da ferramenta, material da peça, atmosfera circundante, tempo de corte e velocidade de corte. Em relação a velocidade de corte, a Figura 25 mostra as regiões de contato em ferramentas de aço rápido após a usinagem de cobre. Nos testes, verificou-se que a distinção da zona 1 em duas partes é possível com o aumento do tempo de usinagem, tendo em vista que a Figura 25a e a Figura 25c são correspondentes a 5 segundos de usinagem, enquanto que a Figura 25b e a Figura 25d foram

obtidas após 300 e 50 segundos, respectivamente. Com o aumento da velocidade de corte de 3 para 120 m/min, a zona 2 foi suprimida. Nessas condições, na Figura 25c e Figura 25d, o deslizamento ocorreu em toda a área de contato principal (zona 1), enquanto em baixas velocidades de corte, o material da peça foi transferido para a ferramenta na zona 2, formando uma ligação mais forte que a resistência ao cisalhamento do cavaco. Mesmo sob condições de aderência, a quantidade de transferência para a zona 1 pode variar ao longo do comprimento de contato.

As marcas do cavaco deixadas na superfície de saída da ferramenta também variam em função do acabamento que é dado a ela. Na Figura 26a, a ferramenta de corte de aço rápido foi polida com pasta de diamante, enquanto que na Figura 26b a ferramenta foi usada sem polimento, ambas na usinagem de cobre sob velocidade de corte de 0,42 m/min. As duas ferramentas de corte apresentam os comprimentos das zonas 1 e 2 semelhantes, porém, na ferramenta de corte polida as regiões marcadas são de visualização mais nítida. Assim como indicado na Figura 25, estas ferramentas apresentaram regiões típicas da zona 1a e 1b quando usadas por mais tempo.

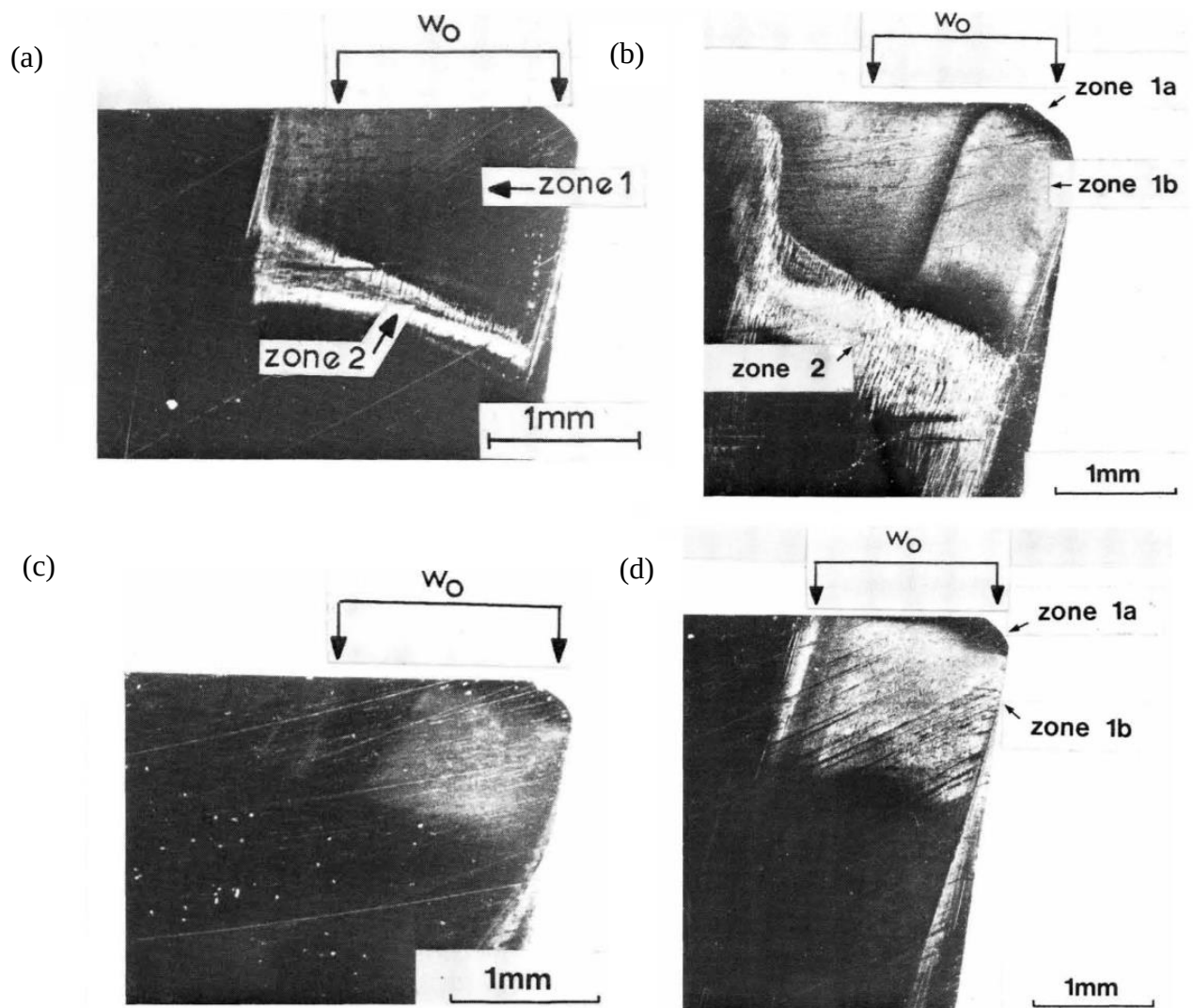


Figura 25: Regiões de contato entre ferramenta de aço rápido e cobre. (a) e (b) 3 m/min; (c) e (d) 120 m/min. Adaptado de Wright (1981) .

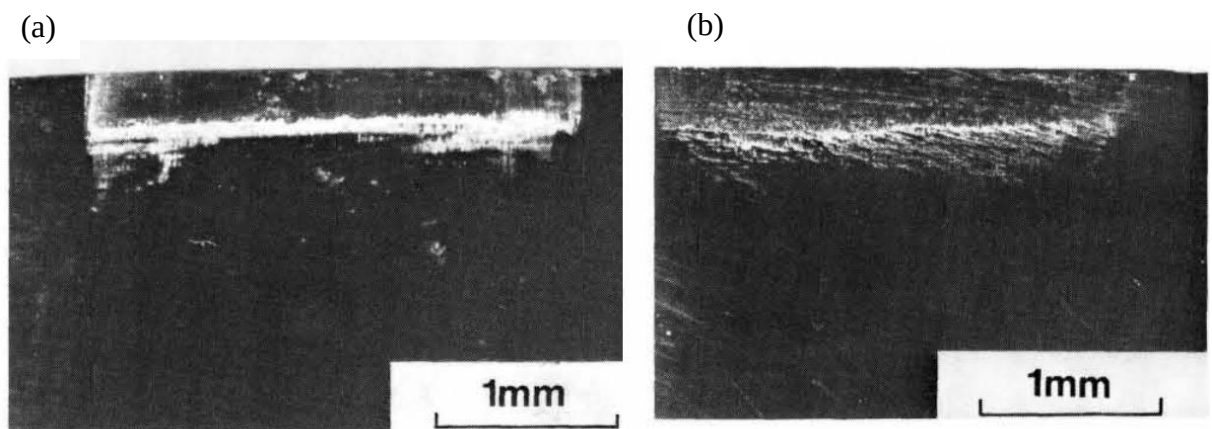


Figura 26: Ferramentas de aço rápido na usinagem de cobre (0,42 m/min). a) ferramenta polida; b) ferramenta sem polimento. Adaptado de Wright (1981).

Ainda, com relação ao trabalho de Wright (1981), o autor empregou um dispositivo *quick-stop* durante a usinagem de cobre sob espessura de corte de 0,2 mm e velocidade de corte de 1,5 m/min, obtendo imagens relativas à zona 1a e zona 1b. Neste caso, a região correspondente a zona 1a, identificada na ilustração da deformação do cavaco, variou de 0,2 a 0,3 mm, respectivos à região OP e OQ. A região da zona 2 compreendeu as regiões PM e QM, variando de 0,45 a 0,55 mm, sendo que o comprimento de contato total de 1a e 1b foi de 3,1 mm.

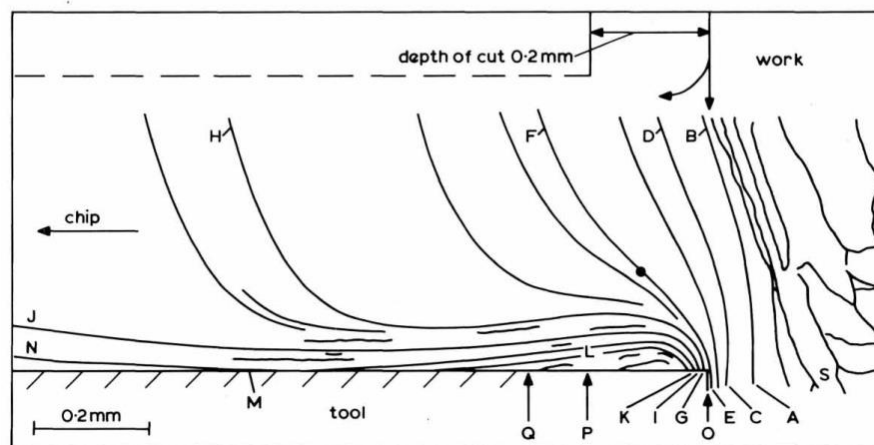


Figura 27: Análise de *quick-stop* para a usinagem de cobre. Adaptado de Wright (1981).

As regiões de aderência e deslizamento, tal como apresentadas são as mais difundidas, mas a determinação de seus comprimentos e áreas é distinta entre muitos autores. Há estudos que apontam que a condição de contato entre cavaco e ferramenta é puramente deslizante (TOROPOV; KO, 2003) ou puramente aderente em situações específicas, podendo obter comprimentos da região de aderência e deslizamento praticamente iguais (WOODWARD, 1977). Siju et al. (2021) apresentam uma comparação entre modelos de predição para estimativa

da área de contato aplicados às ferramentas de corte texturizada. Como resultado, eles apontam que os modelos atuais ainda não convergem com os resultados obtidos experimentalmente por causa, sobretudo, das especificidades inerentes à complexa geometria desses tipos de ferramentas de corte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais e a definição das variáveis de saída a serem avaliadas, bem como os diversos materiais empregados na montagem experimental, desde itens comerciais até o desenvolvimento de dispositivos dedicados às necessidades do trabalho para o cumprimento dos objetivos inicialmente propostos.

3.1 FERRAMENTA, CORPO DE PROVA E MÁQUINA FERRAMENTA

Com o intuito de permitir a fabricação das geometrias das ferramentas de corte de maneira mais fácil, o aço rápido foi o material escolhido, tendo em sua composição 50% de cobalto. Este material foi fornecido em barras de perfil quadrado de 3/8" de largura com comprimento de 4". Para a geometria da ferramenta de corte se adotou um ângulo de saída nulo e um ângulo de folga de 7°. A escolha do ângulo de saída nulo se deve a maior facilidade de fabricação, tanto da ferramenta de corte quanto das microrranhuras em sua superfície de saída, além de ser o um valor comum adotado em boa parte dos trabalhos relacionados ao assunto. Por esta última razão também se deu a escolha do valor do ângulo de folga.

As superfícies de saída das ferramentas de corte apresentaram acabamento superficial retificado, com rugosidade média (R_a) de 0,25 μm , obtida com um rugosímetro SJ 201 fabricado pela Mitutoyo. Inicialmente, as barras de aço rápido recebidas foram cortadas pela metade, em seu comprimento, com auxílio de uma cortadora metalográfica, tendo sua medida final de 50 mm. Em seguida, procedeu-se a preparação da ferramenta de corte para obtenção do ângulo de folga. Para isso, um *setup* (montagem) de afiação foi desenvolvido no torno mecânico convencional Nardini MS205, baseando-se em um mandril fixado na placa, ao qual foi fixado um rebolo de carbeto de silício verde, da fabricante Norton, com dimensões de 6" de diâmetro e 3/4" de largura, com granulometria de 120 mesh, usando uma velocidade de corte de 200 m/min com aplicação abundante de fluido de corte. A ferramenta em aço rápido, presa à torre da máquina, foi inclinada em 7°, sendo executado sua usinagem. Ao fim do processo, o ângulo e folga das ferramentas de corte foram avaliadas em um projetor de perfil Mitutoyo PH-R14 e o raio de sua aresta foi medido em uma lupa, da marca Bioptika. O raio da aresta de corte após a afiação foi de 5 μm .

Os testes iniciais do corte ortogonal buscaram uma configuração que permitisse filmar a operação e medir a força por meio de um dinamômetro. Diante disso, optou-se por duas

configurações diferentes para fixação da peça. A primeira delas (Figura 28a), voltada para a filmagem, foi realizada com o corpo de prova posicionado diretamente entre uma placa de vidro temperado e um conjunto de calços retificados, sendo todos fixados em uma morsa de mordentes e base retificada. Na segunda configuração (Figura 28b), um suporte de fixação foi confeccionado para prender a peça no dinamômetro ou na mesa da fresadora. Tal suporte foi construído com cantoneiras de aço SAE 1020, com espessura de 3/8", sendo as superfícies de contato fresadas. A aplicação do vidro para o *setup* de filmagem foi baseada no trabalho de Sugihara et al. (2021).

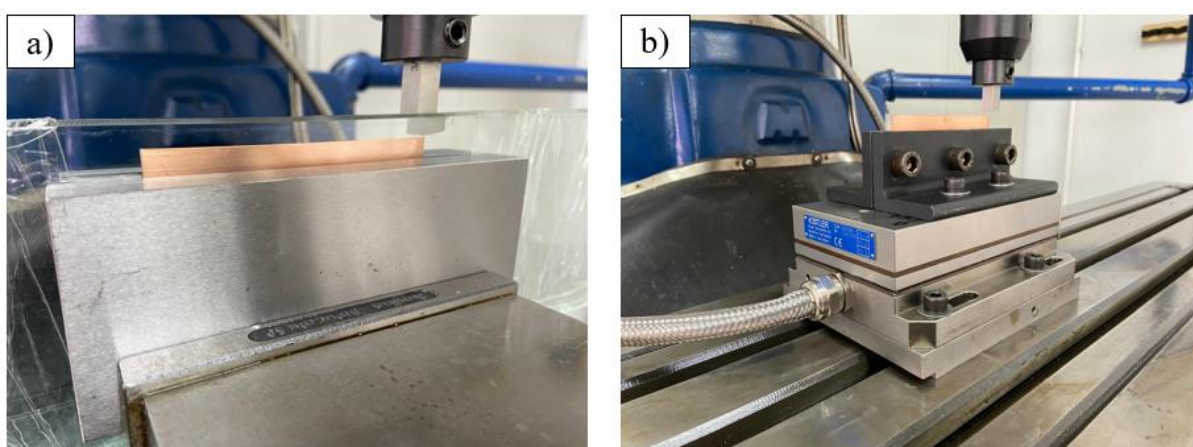


Figura 28: *Setups* de fixação do corpo de prova para (a) filmagem e (b) medição de forças.

A máquina ferramenta utilizada foi uma fresadora ferramenteira, da marca Diplomat, modelo 3001. A fixação da ferramenta de aço rápido se deu em um mandril do tipo porta pinça, com um dispositivo elaborado especialmente para prender a ferramenta de corte de seção quadrada. O dispositivo adaptador foi fabricado em aço SAE 1045, com seção externa cilíndrica e seção interna quadrada, contendo um furo roscado para fixação da ferramenta de corte por meio de parafuso. Antes da execução do furo quadrado, o qual foi realizado pelo processo de eletroerosão, o dispositivo adaptador foi temperado em óleo e revenido. O dispositivo de fixação com a ferramenta de corte pode ser observado na Figura 28.

Os testes iniciais de usinagem foram realizados com o *setup* da Figura 28b, sem o uso do dinamômetro, visando determinar as melhores condições de usinagem. O cabeçote da fresadora precisou ser travado para que a operação do corte ortogonal fosse realizada, evitando seu giro e inclinação, ao passo que a mesa era avançada linearmente. A fresadora conta com um avanço mecanizado da mesa que proporciona uma velocidade de corte de 1 m/min. A baixa

velocidade de corte empregada é justificável, tendo em vista que muitos trabalhos em corte ortogonal usam valores parecidos, como por exemplo em Lo et al. (1966), Lal et al. (1978) e Sugihara et al. (2021). Além disso, devido às limitações de potência do avanço da mesa da fresadora, foram selecionados corpos de prova de 1 mm de espessura com 100 mm de comprimento.

O material do corpo de prova foi o cobre eletrolítico, fornecido pela empresa Aluremetal. As placas fornecidas apresentam 100 mm de comprimento e 200 mm de largura, sendo cortadas em seções de 35 mm de largura para a correta fixação em ambas as condições apresentadas na Figura 28.

Tendo sido definida a velocidade de corte, passou-se para a escolha das espessuras indeformadas de corte ou profundidades de corte (t_1), já que se trata de corte ortogonal. Visando obter várias condições que poderiam proporcionar diferentes comprimentos de contato, foram selecionadas 8 profundidades de corte, sendo 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40 mm. Tais profundidades foram tomadas com base no trabalho de Lo et al. (1966), um dos mais importantes no assunto, e se mostraram compatíveis com a capacidade da fresadora, a qual possui um painel digital com resolução de 5 μm . Tentativas realizadas visando explorar maiores profundidades de corte foram frustradas, tendo sido observado grande instabilidade no corpo de prova ao ponto de flambá-lo e ao mesmo tempo produzir deformação plástica excessiva, como mostrado na Figura 29. O uso de maiores espessuras também gerou limitações quanto à potência instalada da máquina ferramenta.



Figura 29: Deformação excessiva do material do corpo de prova.

Buscando determinar a região de contato entre cavaco e ferramenta de corte, a fim de estabelecer as posições adequadas das microrranhuras, foram realizadas medições e observações dos comprimentos de contato cavaco-ferramenta. Considerando as dificuldades de predição, foram realizados testes iniciais, com a segunda configuração de *setup* e sem o uso de dinamômetro, para a determinação experimental da região de contato. Considerando que o tempo de usinagem foi de 10 segundos, não houve desgaste aparente da superfície de saída, assim como a ausência de adesão. Em seguida, buscou-se medir a região de contato cavaco-ferramenta com tinta e revestimento sobre a superfície de saída.

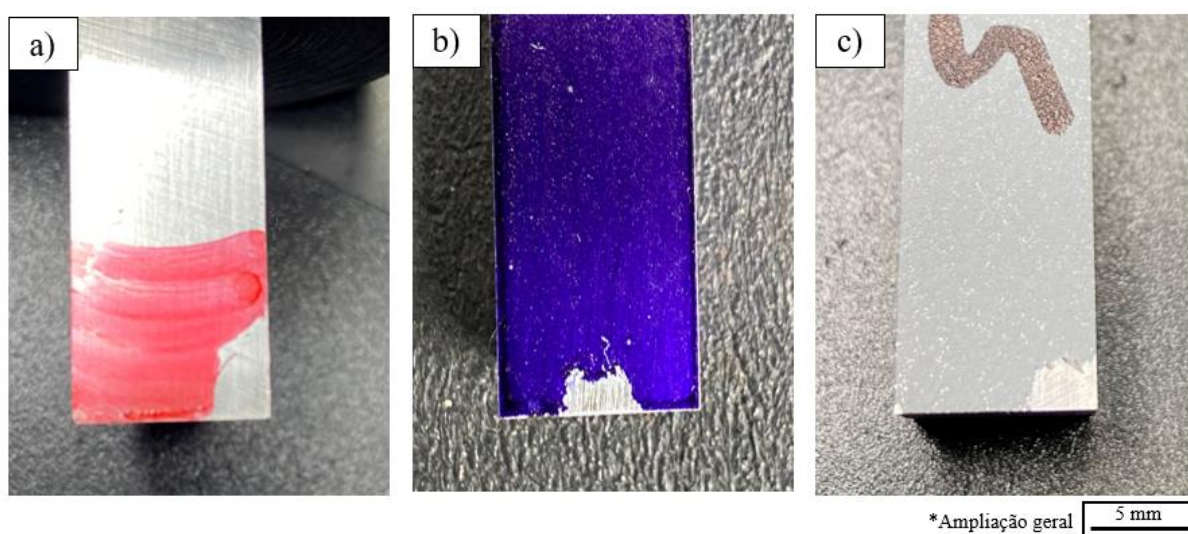


Figura 30: Superfície de saída recoberta com (a) tinta de marcador permanente, (b) tinta de marcação de peças - azul da Prússia (b) e (c) *primer* para pintura.

Utilizando tinta de marcador permanente e tinta de marcação de peças, tipo azul da Prússia e tinta *primer*, mostradas na Figura 30(a, b e c), foram observadas grandes regiões de contato. Observações diretas durante estes testes indicaram que o cavaco tendia a descolar as tintas para o caso a e b (Figura 30), culminando na retirada da tinta de regiões as quais não ocorreu contato entre o cavaco e a ferramenta. No caso c (Figura 30), a tinta apresentava um comportamento quebradiço, culminando no lascamento de regiões onde não ocorreu contato. Dado o insucesso, buscou-se criar marcas de retificação de direção conhecida na superfície de saída da ferramenta, o que não surtiu o efeito desejado, uma vez que o desgaste dessas marcas foi pequeno. Por fim, procurou-se utilizar um ácido para gerar uma corrosão na superfície de saída da ferramenta de corte. Com esse intuito, Gad et al. (1992) utilizam uma mistura de ácido hidrofúorídrico, peróxido de hidrogênio e persulfato de amônio para gerar oxidação na

superfície da ferramenta de corte, em aço rápido, visando identificar a área de contato. Nesta direção, foi utilizada uma mistura de 4% ácido acético, 95% de álcool hidratado (grau 70) e 1% de ácido clorídrico. Como resultado, essa solução gerou uma oxidação superficial, a qual permitiu a identificação da região de contato.

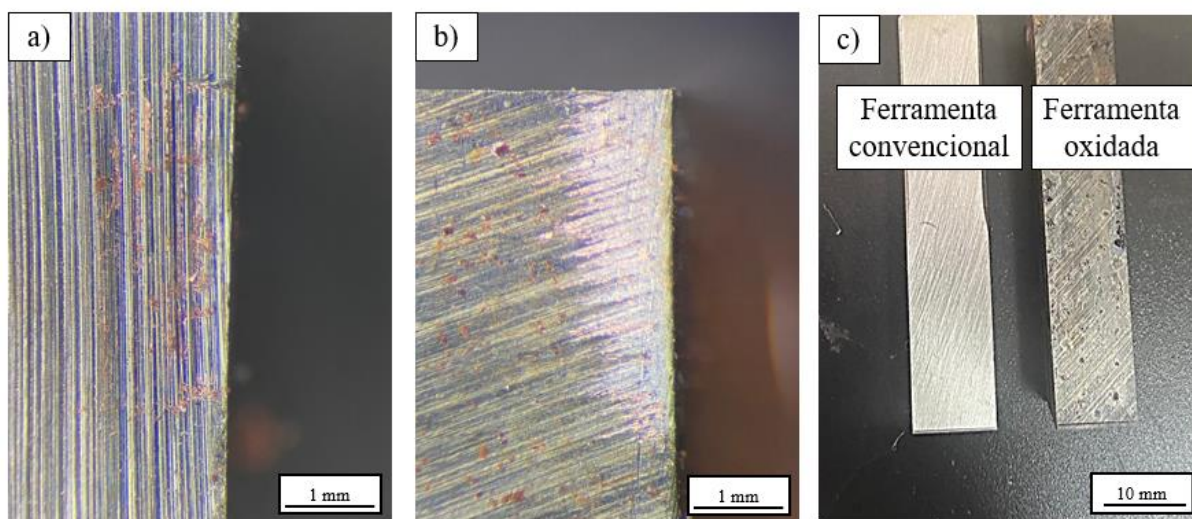


Figura 31: Ferramenta com superfície de saída (a) retificada, (b) oxidada e (c) diferença visual entre não oxidada e oxidada.

A ferramenta de corte oxidada é mostrada na Figura 31b, para o qual fica nítida a região de contato. Na Figura 31c são comparadas as ferramentas de corte sem oxidação e oxidada, em que é possível identificar o escurecimento desta última. Todavia, este método se mostrou viável somente quando se tentou a aplicação de um papel toalha umedecido com a citada solução sobre a ferramenta, sob um tempo de ataque de, aproximadamente, 10 horas.

Após os ensaios, as regiões de contato foram visualizadas com um microscópio tipo lupa e fotografadas com uma câmera digital. As imagens foram inseridas no *software AutoCad* para avaliação dos comprimentos de contato. A Tabela 5 apresenta o valor de cada espessura indeformada de cavaco (espessura de corte) empregado no corte ortogonal do cobre e o correspondente valor do comprimento de contato, usando ferramenta convencional. Cada condição foi repetida três vezes.

Tabela 5: Espessura indeformada de cavaco e seu respectivo comprimento de contato.

Espessura indeformada de cavaco - t_1 (mm)	Comprimento de contato (mm)
0,05	0,55
0,10	0,67
0,15	0,88
0,20	1,00
0,25	1,05
0,30	1,12
0,35	1,25
0,40	1,36

3.2 DEFINIÇÃO E FABRICAÇÃO DA FERRAMENTAS COM MICRORRANHURA E FERRAMENTA DE CONTATO RESTRITO

Considerando os apontamentos da revisão bibliográfica quanto à avaliação de ferramentas com microrranhuras, juntamente aos apontamentos realizados em revisão bibliográfica sobre o tema (RIBEIRO et al., 2019), foram adotadas microrranhuras posicionadas perpendicularmente ao movimento do cavaco. Considerando que alguns autores mantêm a posição da microrranhura e variam a espessura de corte, ao passo que outros mantêm a espessura de corte e alteram o posicionamento das microrranhuras, optou-se pelos diferentes posicionamentos das microrranhuras em relação à espessura de corte. Quanto às ferramentas de contato restrito, foram adotadas condições que permitissem o aumento gradativo do contato cavaco-ferramenta. Como apresentado na Figura 32, os parâmetros adotados para a ferramenta de contato restrito foram o comprimento de contato restrito da superfície de saída (l) e a profundidade necessária para a restrição do contato (d). Para as ferramentas com microrranhura, foram determinadas a posição da microrranhura em relação à aresta de corte (l_1), a largura da microrranhura (l_2) e profundidade da microrranhura (dg), das iniciais em inglês de *groove depth*, representadas na Figura 32b.

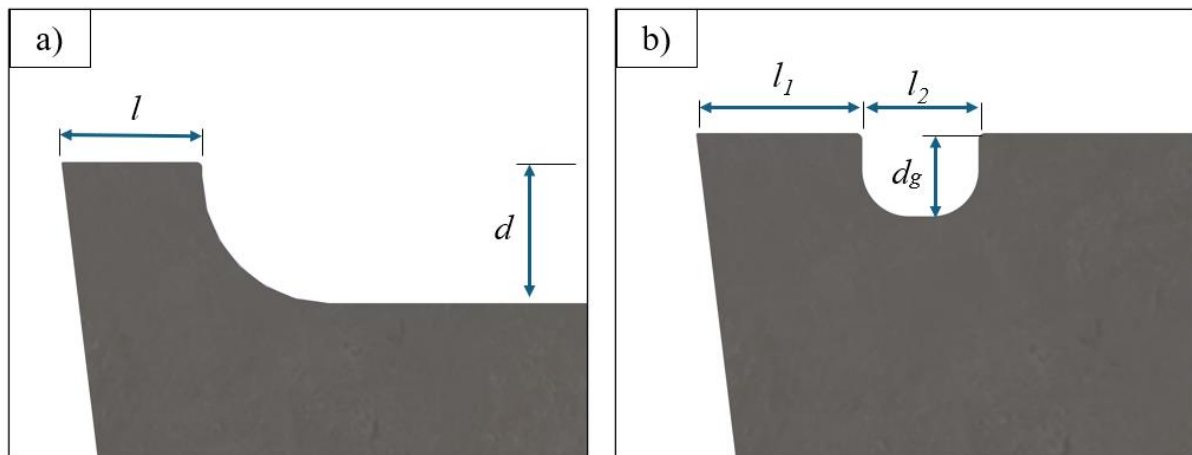


Figura 32: Parâmetros geométricos das ferramentas de corte (a) de contato restrito e (b) com microrranhura (b).

Tendo sido observados os comprimentos de contato para a ferramenta convencional em diferentes espessuras indeformadas de cavaco (t_1), conforme apresentado na Tabela 5, para a determinação da posição da microrranhura levou-se em consideração a mencionada região de contato. Lo et al. (1966) utilizaram ferramentas de contato restrito com os comprimentos de contato de 0,254, 0,381, 0,508 e 0,762 mm, apresentados em polegadas em seu artigo. Para tanto, a seleção dos comprimentos da superfície de saída (l) para as ferramentas de contato restrito foram de 0,25, 0,50 e 0,75 mm, e posteriormente usados outros comprimentos de 1,00, 1,25 e 1,50 mm, de modo a permitir a obtenção do comprimento de contato real para todas as condições. A profundidade (d) adotada foi de 0,50 mm, de modo a evitar o contato da ferramenta com o cavaco. Ao longo do texto neste trabalho, as ferramentas de contato restrito foram identificadas pelo seu acrônimo em inglês RC (*restricted contact*), seguido por um número, que indica o comprimento de sua superfície de saída. As representações das condições idealizadas para as ferramentas de contato restrito são apresentadas na Figura 33.

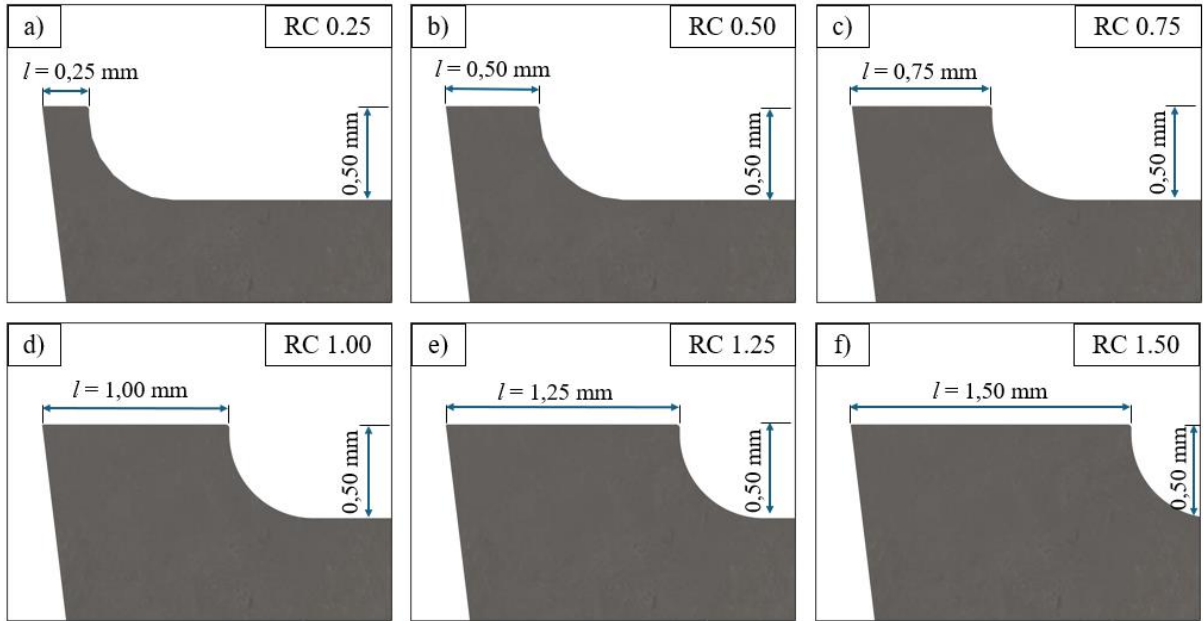


Figura 33: Ferramentas de contato restrito usadas no trabalho com comprimento da superfície de saída de (a) 0,25, (b) 0,50, (c) 0,75, (d) 1,00, (e) 1,25, (f) 1,50 mm.

As microrranhuras foram posicionadas às distâncias de 0,25, 0,50 e 0,75 mm da aresta de corte (l_1), correspondendo ao mesmo comprimento da superfície de saída (l) das três primeiras ferramentas de contato restrito. A profundidade da microrranhura (d_g) adotada foi 0,25 mm, valor julgado a ser suficiente para permitir a observação da formação do corte derivativo em filmagens. Além disso, tal profundidade foi explorada por Ribeiro et al. (2024) e mostrou-se adequada. Na Figura 34 são apresentadas as posições (l_1) e larguras das microrranhuras (l_2) das ferramentas de corte. As ferramentas de corte com microrranhura de l_2 de 0,35 mm foram designadas por LG (*large groove*) e as ferramentas de corte com microrranhura l_2 de 0,15 mm foram nomeadas como SG (*small groove*). A Tabela 6 traz todas as medidas das ferramentas de contato restrito e ferramentas com microrranhura avaliadas, de acordo aos parâmetros apresentados na Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

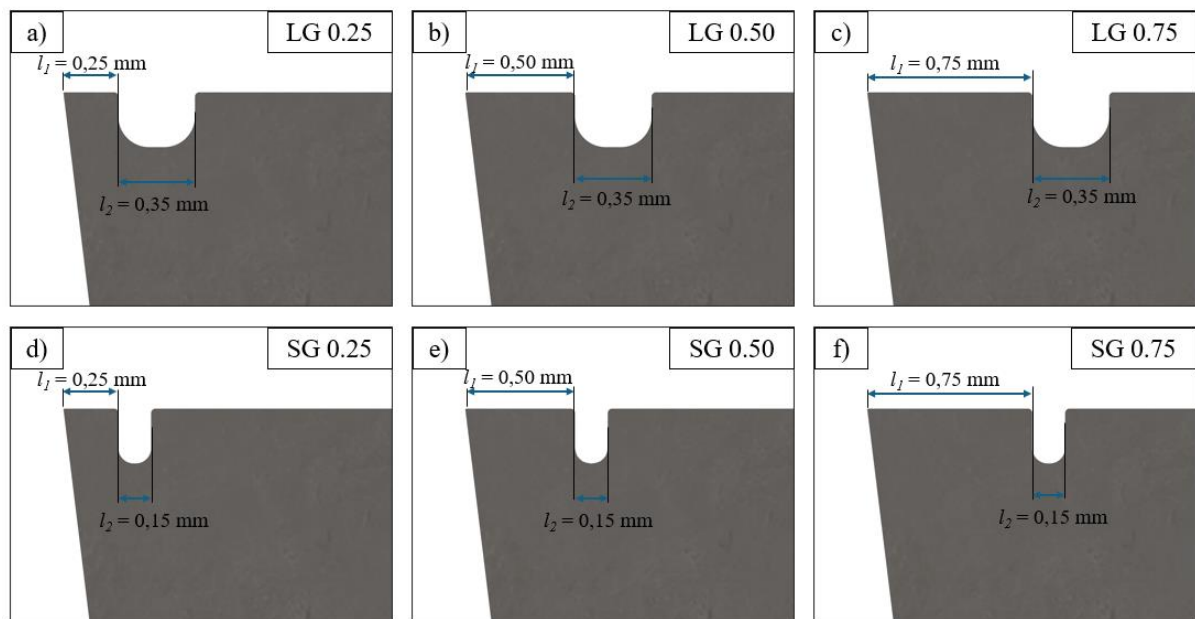


Figura 34: Ferramentas de corte com microrranhuras de diferentes designações: (a) LG0.25, (b) LG0.50, (c) LG0.75, (d) SG0.25, (e) SG0.50 e (f) SG0.75.

Tabela 6: Ferramentas de corte empregadas nos ensaios.

Ferramenta	Tipo	l_1 ou l (mm)	d ou d_g (mm)	l_2 (mm)
RC0.25	Contato restrito	0,25	0,50	Não se aplica
RC0.50	Contato restrito	0,50	0,50	Não se aplica
RC0.75	Contato restrito	0,75	0,50	Não se aplica
RC1.00	Contato restrito	1,00	0,50	Não se aplica
RC1.25	Contato restrito	1,25	0,50	Não se aplica
RC1.50	Contato restrito	1,50	0,5	Não se aplica
LG0.25	Microrranhura	0,25	0,25	0,35
LG0.50	Microrranhura	0,50	0,25	0,35
LG0.75	Microrranhura	0,75	0,25	0,35
SG0.25	Microrranhura	0,25	0,25	0,15
SG0.50	Microrranhura	0,50	0,25	0,15
SG0.75	Microrranhura	0,75	0,25	0,15

Em seguida, o processo de fabricação das geometrias para restrição de contato, bem como a fabricação das microrranhuras foi efetuado. Para isso, uma máquina de eletroerosão por penetração, da marca Agie Charmiles, modelo SP1 foi utilizada. O *setup* aplicado para a modificação das ferramentas de corte é apresentado na Figura 35.

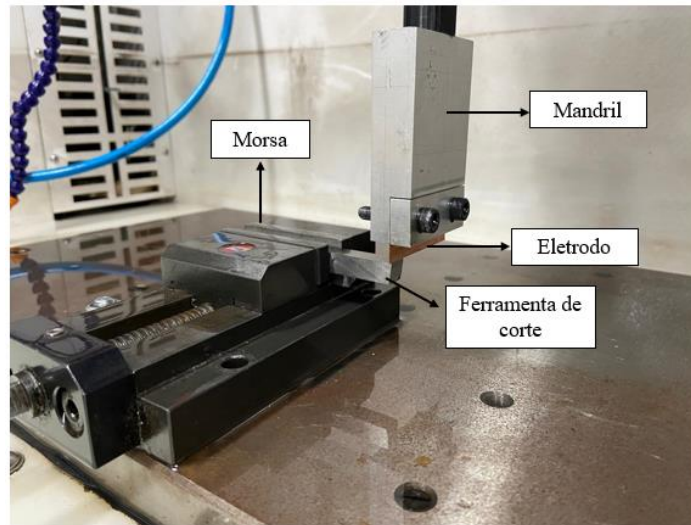


Figura 35: *Setup* para fabricação das ferramentas de corte.

O eletrodo empregado apresentou comprimento de 50 mm e largura de 10 mm, enquanto sua espessura foi de 0,1 e 0,3 mm para a fabricação das microrranhuras. No caso das ferramentas de contato restrito, o eletrodo usado teve uma espessura de 6,35 mm. Testes iniciais mostraram que os parâmetros de usinagem *standard* fornecidos pela máquina, para emprego no par cobre-aço, foram satisfatórios. A Tabela 7 apresenta os parâmetros da operação da eletroerosão. Como resultado, as medidas nominais das cavidades erodidas tiveram aumentos de 0,05 mm nas laterais e profundidade. Isto posto, as medidas (l_1) e (d_g) das ferramentas com microrranhura, bem como (l) e (d) das ferramentas de contato restrito, puderam ser controladamente compensadas na programação para obtenção das principais medidas. A largura das microrranhuras (l_2), por sua vez, foi ampliada. Salienta-se, ainda, que tais parâmetros mostraram bom rendimento quanto ao desgaste do eletrodo e tempo de usinagem.

Tabela 7: Parâmetros sugeridos pelo fabricante da máquina para eletroerosão do par aço-cobre.

“Gap” (mm)	Rugosidade - Ra (μm)	Corrente (PI) - A	Intervalo de pulso (PG) - adimensional	Duração do pulso (PW) - adimensional	Tensão média (V)
0,055 a 0,12	1,9	5	6	10	75

As ferramentas de corte fabricadas foram avaliadas por microscopia ótica, visando identificar possíveis problemas de fabricação. Por fim, as ferramentas de corte prontas são apresentadas na Figura 36.

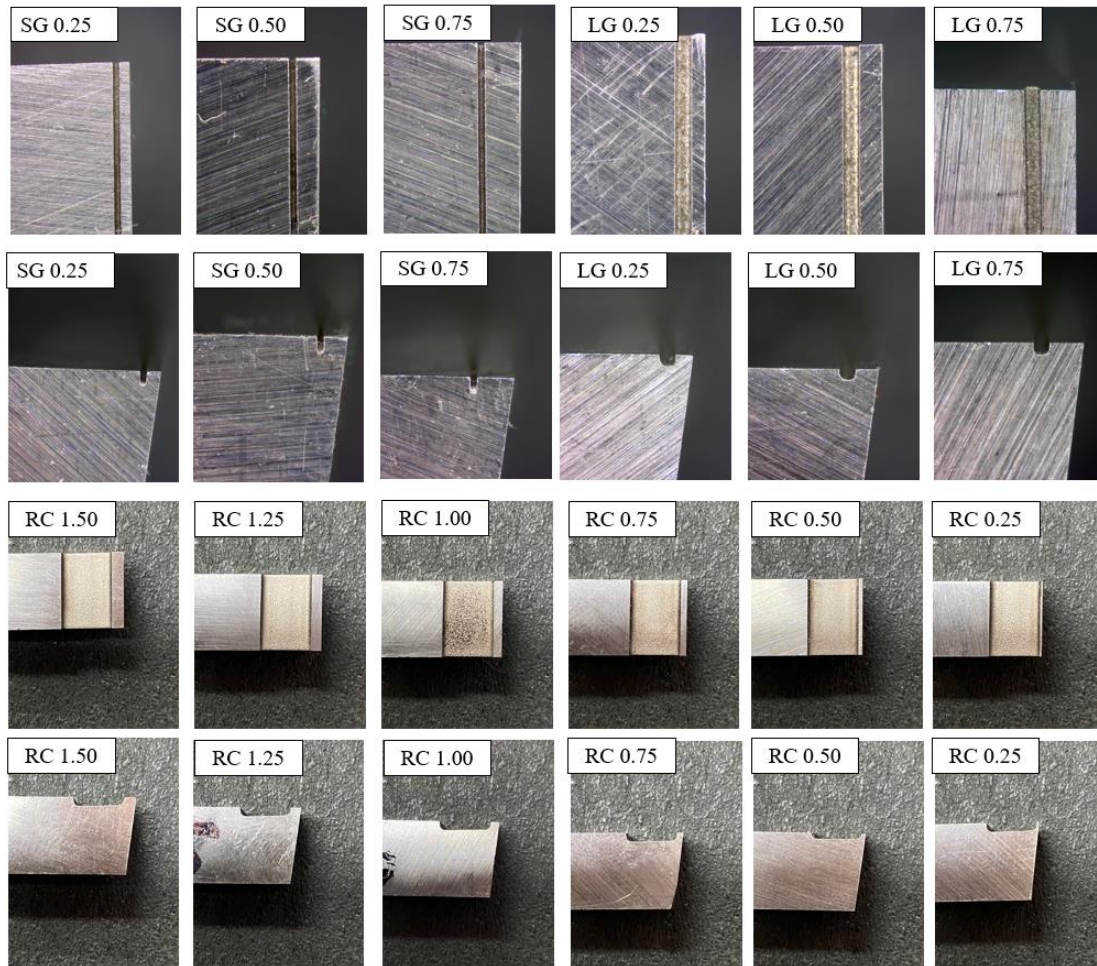


Figura 36: Ferramentas de corte prontas após a operação de eletroerosão.

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE IMAGEM E FORÇA

Uma das aquisições de dados mais importantes do trabalho refere-se a filmagem do corte por meio das ferramentas mencionadas na seção anterior. O *setup* (montagem) completo com uso da câmera é mostrado na Figura 37. Nesta configuração, foi usada uma câmera digital com 38 megapixel, da marca Yizhan, com capacidade de filmagem em 60 frames por segundo. Essa câmera, empregada, principalmente, em microscópios para manutenção de eletrônicos, possui *hardware* próprio de filmagem e fotografia, o que permite a inserção de um cartão de memória

para aquisição de dados, sendo operada por controle remoto. A visualização em tempo real da filmagem foi feita através de comunicação via cabo hdmi com um monitor de vídeo. À essa câmera, foi acoplado uma lente de ampliação de até 130 vezes, a qual permitiu a filmagem em ampliações de até 45 vezes. A fim de garantir a iluminação adequada, inicialmente um sistema de iluminação em *led* para microscópios foi usado, todavia, devido a impossibilidade de maior aproximação com a morsa de fixação, uma luminária especial de diâmetro reduzido precisou ser desenvolvida.

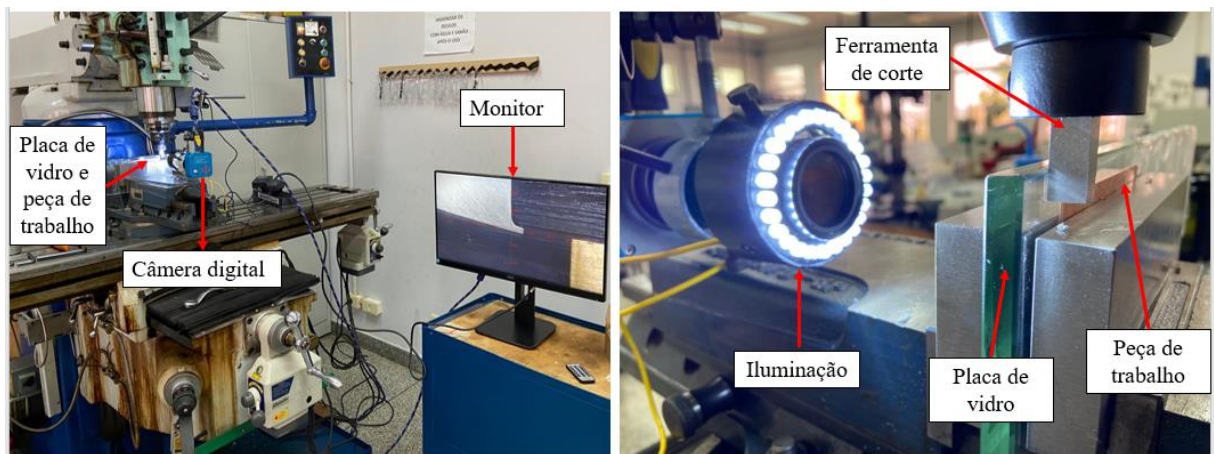


Figura 37: Montagem experimental para filmagem de corte ortogonal.

Efetuada as filmagens, os arquivos foram avaliados em computador, através do software Media Player, o qual permite avanço da filmagem por *frame* e exportação da imagem do vídeo em formato de imagem.

Para a avaliação da força de usinagem, especificamente a força normal (FN) e força tangencial (FT), usou-se um dinamômetro piezoelétrico de três componentes da marca Kistler, modelo 9257BA, acoplado a sua unidade de controle-amplificação 5233 A1. As saídas coaxiais da unidade de controle-amplificação do dinamômetro foram conectadas a um módulo de aquisição de dados analógicos da *National Instruments*, modelo NI-9207, conectado ao chassi de ethernet cDaq-9188, e lidos em um computador com *software LabView* em uma frequência de aquisição de 200 HZ. A montagem experimental (*setup*) com o sistema de aquisição de dados completo é mostrada na Figura 38.

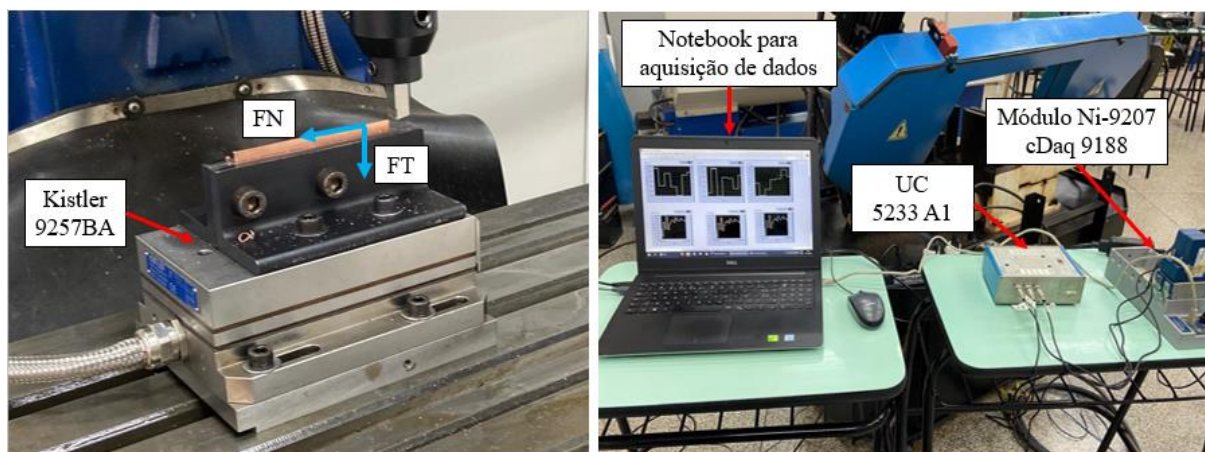


Figura 38: Setup para aquisição de forças.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO *QUICK-STOP*

Pesquisas utilizando dispositivos de parada rápida de usinagem, denominados *quick-stop device*, designado em diante pelo acrônimo QSD, tem sido empregado no estudo dos mecanismos de formação de cavaco, principalmente no passado. No entanto, um dispositivo desse tipo, que seja bem-sucedido, exige grande rigidez e altas velocidades de retração, não sendo fácil seu projeto e construção. Apesar de sua grande utilidade, não se tem registro na literatura do seu uso no estudo da formação de cavaco com ferramentas estruturadas/texturizadas, em especial com uma microrranhura, como a objeto desse estudo.

Como requisitos, buscou-se o desenvolvimento de um QSD que pudesse ser acoplado à máquina ferramenta, especificamente o torno Nardini MS 205, sem necessidade de modificações estruturais, e que não utilizasse pinos cisalhantes ou cargas explosivas. Para tanto, sistemas de acionamento elétricos e eletromagnéticos foram avaliados, porém sem resultados satisfatórios. O acionamento mecânico mostrou-se promissor, tendo sido o projeto inicialmente focado na determinação da geometria do mecanismo de retração e mecanismo do gatilho.

Dada a disponibilidade, o projeto foi baseado em uso de mancais autocompensadores com rolamentos, modelo P205, com diâmetro de 30 mm. Além disso, o material utilizado nos componentes usinados foi o aço SAE 1045 trefilado, dado a sua boa relação de resistência mecânica e custo. A determinação geométrica teve como princípio o emprego de porta-ferramentas convencionais e sua rotação em ângulo suficiente para a remoção da ferramenta de corte da interface de contato, sem comprometer o cavaco aderido ao corpo de prova.

A proposta inicial, apresentada na Figura 39 (a e b), indica a posição de retração e avanço do porta-ferramenta. Tal proposta considerava a fixação do porta-ferramenta em componente de seção retangular, que por meio de um flange era fixada ao eixo, apoiado aos mancais. Os testes iniciais de usinagem mostraram instabilidade quando posto em usinagem, por isso partiu-se para a solução representada na Figura 39c.

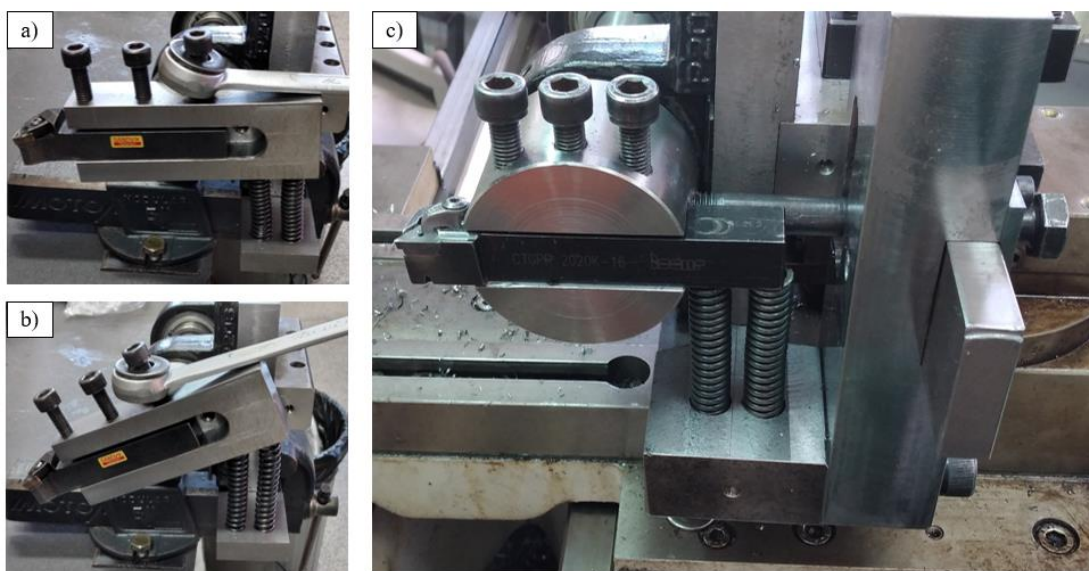


Figura 39: Desenvolvimento inicial do QSD em sua (a) posição de retração, (b) posição de avanço e (c) configuração final.

A imagem representada na Figura 39 mostra o conjunto com duas molas. As molas em questão apresentavam comprimento máximo de 71,2 mm e mínimo de 53,3 mm, com uma força de compressão máxima de 490 N. A adoção dessas molas deu-se, inicialmente, devido aos comprimentos máximo e mínimo adequados ao projeto, bem como o diâmetro externo de 11,2 mm, permitindo que se utilizasse até 4 molas para teste.

As alterações mostradas na Figura 39c propuseram a utilização de um eixo maciço para a fixação do porta-ferramentas, compreendendo a fixação do porta-ferramentas em uma seção de 75mm de diâmetro, com o restante em um diâmetro de 30 mm para a posicionamento nos mancais. A Figura 40 representa o conjunto móvel do QSD, sendo possível notar o eixo de rotação, ferramenta de corte, porta-ferramenta, parafusos de fixação do porta-ferramenta e o parafuso do gatilho. O mecanismo de gatilho, representado na Figura 41 dispõe de uma estrutura principal, ao qual existe uma ranhura rebaixada em sua face para o deslizamento do gatilho, que é realizado pelo acionamento manual da alavanca, que por meio das articulações dispostas no mecanismo permite a retração do gatilho e a liberação do parafuso do gatilho (Figura 40).

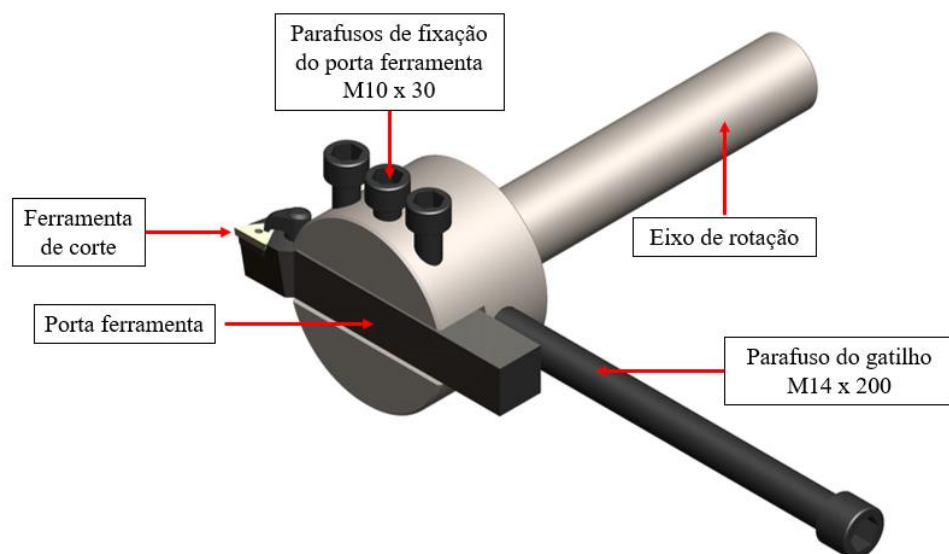


Figura 40: Representação do conjunto móvel do QSD.

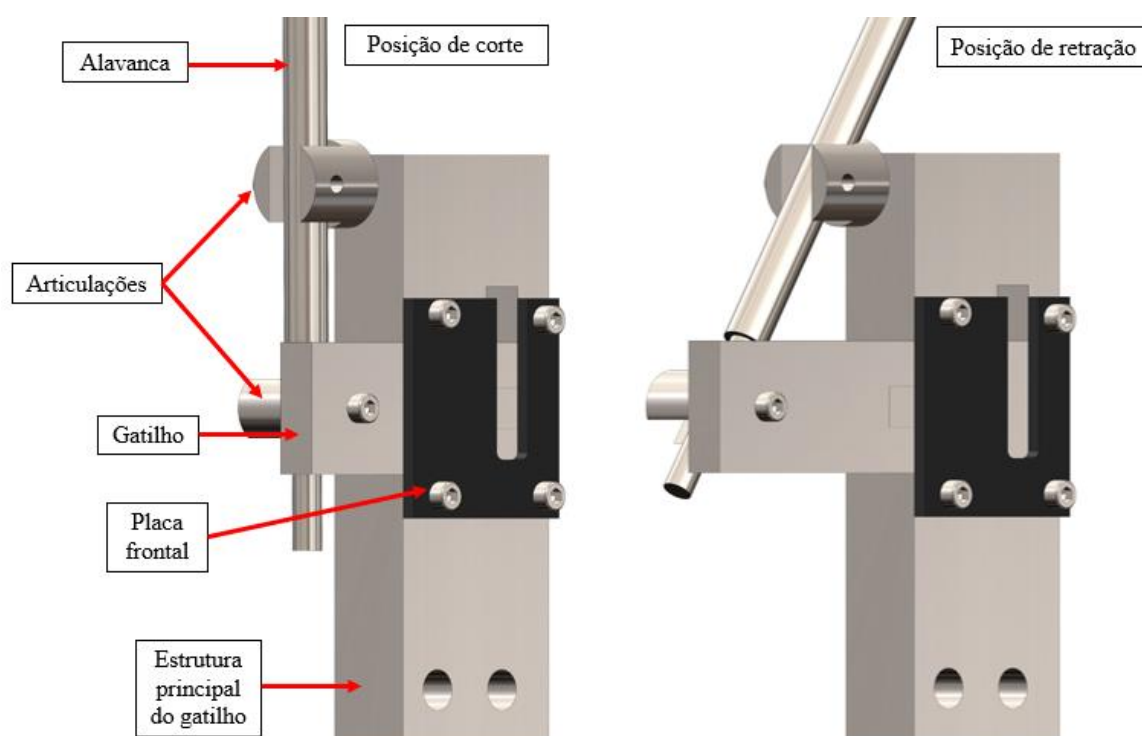


Figura 41: Componentes e funcionamento do gatilho

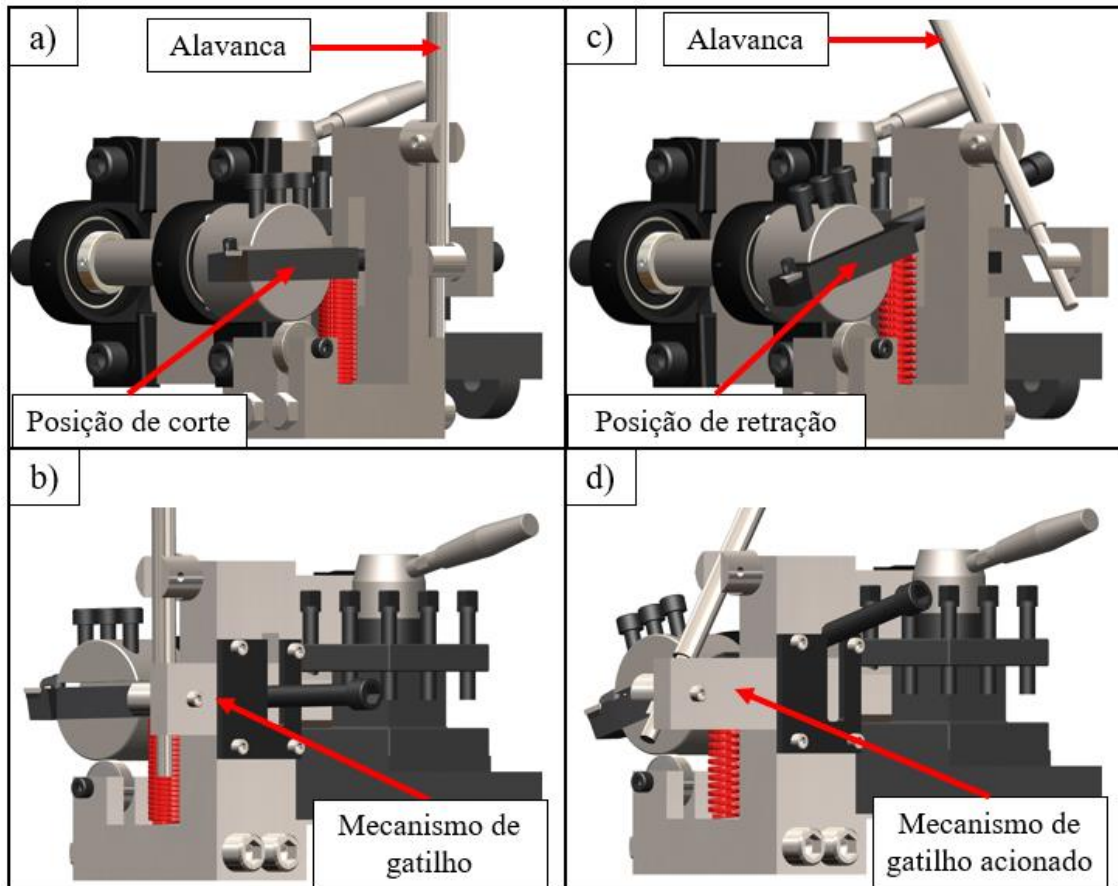


Figura 42: QSD final em (a) posição de corte (vista frontal), (b) mecanismo de gatilho em posição de corte (vista traseira), (c) posição de retração (vista frontal) e (d) mecanismos de gatilho acionado (vista traseira).

O conjunto completo é indicado na Figura 42. Na posição de corte (Figura 42a e Figura 42d) o parafuso do mecanismo de gatilho permite a usinagem. Na posição de retração (Figura 42b e d), a alavanca é acionada retraindo o mecanismo, permitindo que a ação da mola gire em ângulo de 16° no conjunto móvel.

Tendo sido determinada a configuração geométrica, foram avaliadas a aceleração e velocidade de retração, permitindo a escolha da mola adequada ao conjunto. Para tanto, a medição do deslocamento angular em função do tempo fez uso de uma placa de aquisição de dados modelo PCI 6221, fabricada pela *National Instruments*, juntamente a um *encoder* com 600 pulsos por rotação e o *software* MatLab. O teste em bancada é mostrado na Figura 43.

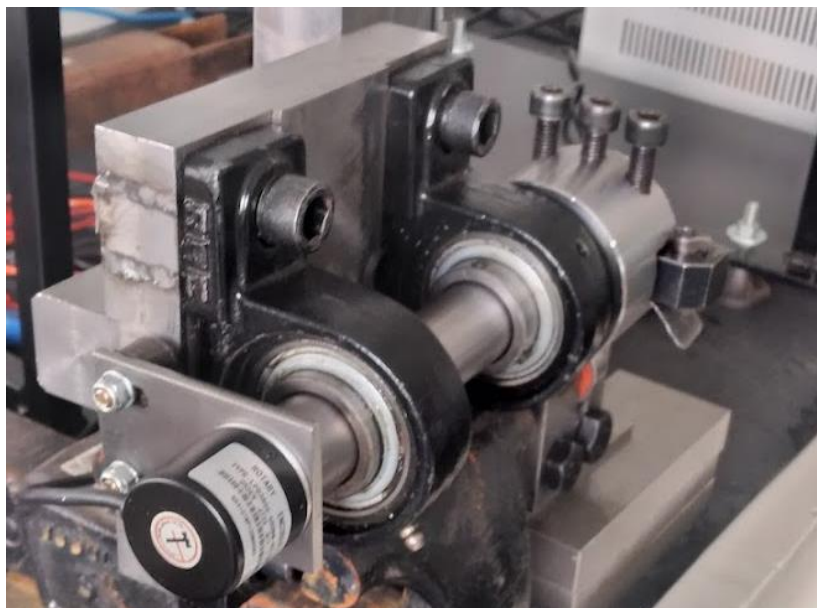


Figura 43: Teste de bancada para mediação das condições de retração da ferramenta de corte no *quick-stop*.

Os dados medidos foram confrontados com os dados teóricos determinados pela análise dinâmica do movimento. O momento de inércia do conjunto móvel em relação ao z, eixo esse correspondente ao eixo de rotação, foi determinado através do *software* SolidWorks. A validação desse valor foi aferida por meio da comparação das massas reais e determinadas em *software*. A massa determinada por *software* foi de 3178,77 gramas e a massa real de 3111,5 gramas, gerando um erro de, aproximadamente, 2%. Tal erro se deve aos perfis de roscas internas e externas não representados em ambiente virtual.

Considerando variadas velocidades de corte, o projeto do QSD previu alcançar velocidades de corte de até 150 m/min. No entanto, é necessário que a ferramenta de corte seja recuada em velocidades da ordem de, pelo menos, duas vezes maior que a velocidade de corte, conforme apontam Machado et al. (2011). Isto posto, considerando que o conjunto móvel realiza um movimento circular, com centro de rotação alinhado axialmente ao eixo fixado aos mancais, foram adotadas as equações do movimento circular juntamente ao princípio de D'Alembert (BEER et al., 2019), através das Equações (7), (8), (9) e (10).

$$\sum M = I_{zz} \cdot \alpha \quad (7)$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (8)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \quad (9)$$

$$V = \omega \cdot r \quad (10)$$

Onde:

M = momento torsor;

I_{zz} = momento de inércia no eixo z;

ω = velocidade angular;

ω_0 = velocidade angular inicial;

α = aceleração angular;

θ = variação angular;

r = raio;

V = velocidade tangencial.

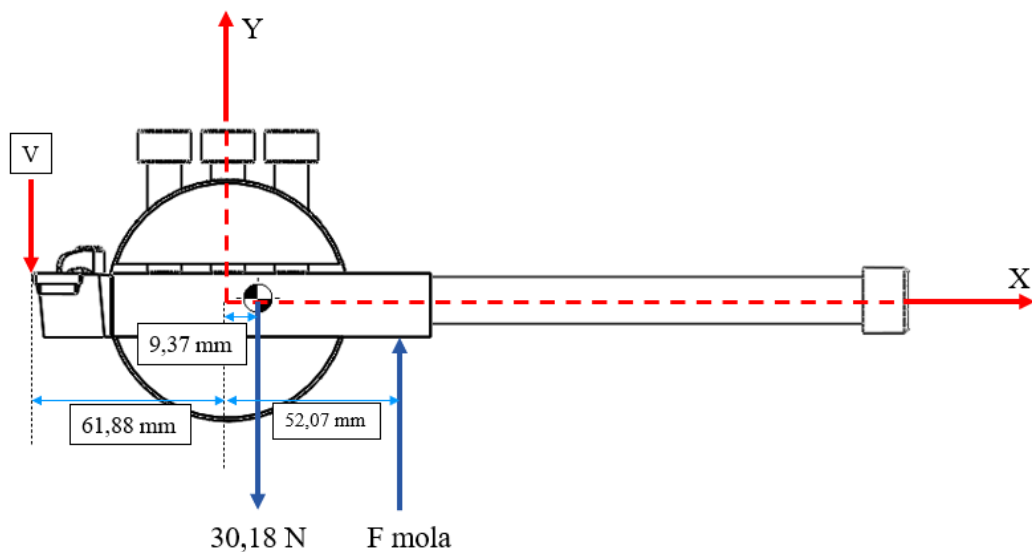


Figura 44: Parâmetros geométricos para determinação da força da mola no QSD.

Através da Equações (7) a (10), adotando um momento de inércia de $6,17 \cdot 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$, junto a um valor de 300 m/min, tomado como a velocidade tangencial de retração da aresta de corte, e fazendo uso do deslocamento de 16° juntamente aos parâmetros mostrados na Figura 44, foi possível determinar que a mola deveria apresentar uma força de 1393 N. Testes experimentais realizados com 4 molas, com uma força total de 1960 N mostraram que a velocidade obtida foi de 216,75 m/min, ao passo que a velocidade teórica seria de 355,96 m/min. Desta forma, a influência do atrito nos rolamentos, bem com a influência do tipo lubrificante poderiam estar causando dificuldades na aceleração inicial do conjunto. Substituindo a graxa dos rolamentos por um lubrificante de baixa viscosidade, no caso WD-40, foram obtidas velocidades de retração de 339 m/min, indicando um erro em torno de 5% ao valor de teórico de referência.

Devido às dificuldades de compressão no conjunto de 4 molas, uma mola da fabricante Ômega, modelo OMC 25089 CP, com 2270 N de carga, foi escolhida.

A seleção desta mola buscou as condições de comprimento semelhantes, bem como a carga mais próxima do conjunto de 4 molas. Com isso, a velocidade de retração teórica passaria a ser de 382,65 m/min, enquanto a velocidade de retração real foi de 377 m/min. Após todas as modificações necessárias, o QSD foi submetido a um tratamento superficial de oxidação negra, sendo possível visualizar sua condição final na Figura 45.



Figura 45: Montagem final do QSD.

Testes foram realizadas em diferentes velocidades de corte, evidenciando a funcionalidade do QSD. Na Figura 46, são apresentados testes realizados em aço SAE 1045 (a) e em tubo de aço SAE 1020 (b). Após realizados os testes, amostras foram seccionadas com auxílio de uma microretífica, para que em seguida fossem embutidas em baquelite, lixadas, polidas e atacadas quimicamente para visualização em microscópio. Uma amostra de um cavaco de aço SAE 1020 é apresentada na Figura 47.

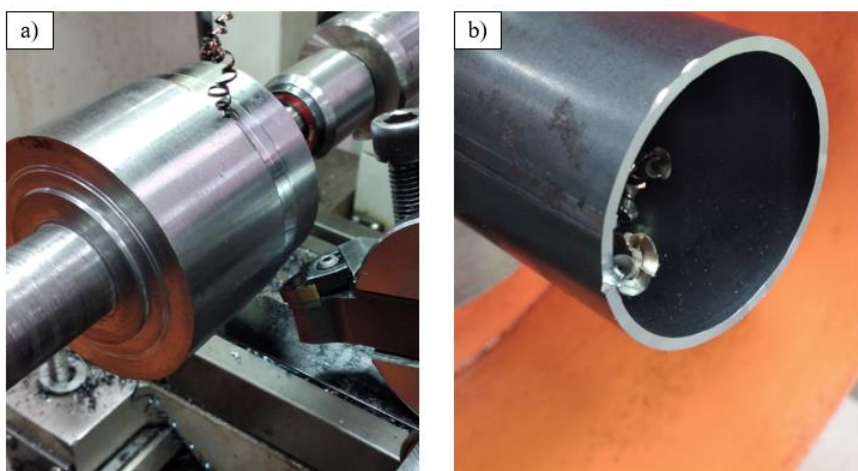


Figura 46: Testes do QSD: (a) aço SAE 1045 e (b) tubo de aço SAE 1020.

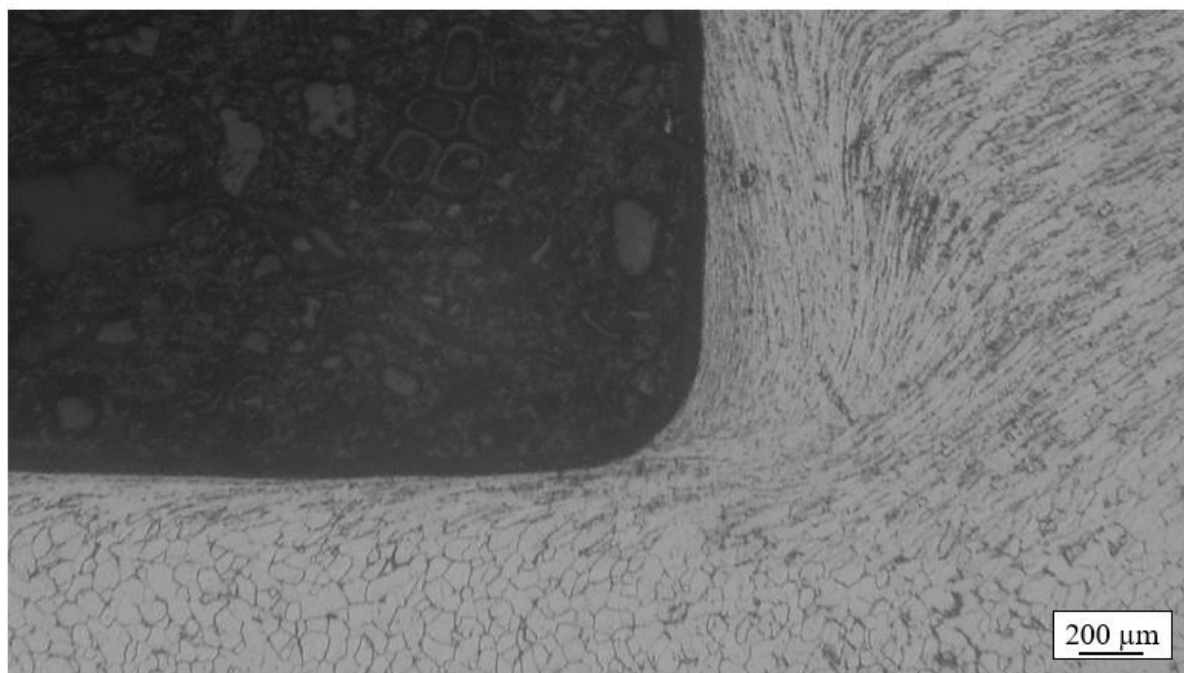


Figura 47: Micrografia do cavaco em aço SAE 1020 obtida por meio de dispositivo *quick-stop* sob velocidade de corte de 100 m/min.

Tendo sido realizados testes iniciais com aço, também foram realizados testes usando QSD na usinagem de cobre. Um tubo de cobre eletrolítico, de 75 mm de diâmetro externo, espessura de parede de 1 mm e comprimento de 200 mm, fornecido pela empresa Aluremetal, foi empregado nos ensaios. Visando melhores condições de fixação do tubo na placa do torno, um tarugo maciço de Nylon foi usinado na medida interna do tubo, sendo posicionado no ponto de fixação com a placa do torno. Para esta aplicação, uma velocidade de corte de 15 m/min foi selecionada, com um tempo de usinagem de 4 segundos. A baixa velocidade de corte e o tempo reduzido são devidos à tentativa de minimização da temperatura nesta avaliação. O avanço foi selecionado em 0,2 mm/volta, sendo essa a espessura de corte média no corte ortogonal. O QSD montado no torno mecânico é apresentado na Figura 48a, observando-se a fixação do tubo de cobre eletrolítico. A Figura 48b apresenta a interrupção do processo de usinagem, com o cavaco aderido à seção do tubo. O processo subsequente para a obtenção das peças foi realizado de maneira semelhante ao aço, visando permitir a observação da seção interna do cavaco em microscópio.

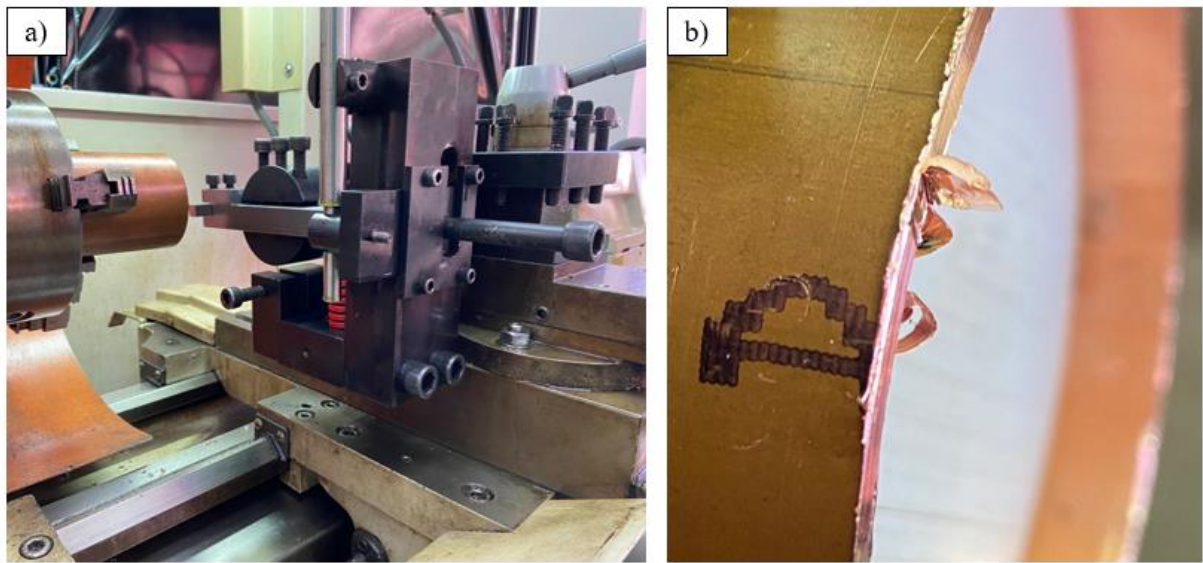


Figura 48: Aplicação do QSD no tubo de cobre.

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISES

Considerando que no total foram determinadas 6 configurações para as ferramentas de contato restrito e 6 configurações para as ferramentas com microrranhura, somada à ferramenta convencional, empregando 8 profundidades de corte diferentes, são totalizadas 104 condições para o corte ortogonal. Assim, foram realizadas 104 filmagens no corte ortogonal, seguidas de 104 medições de força na usinagem realizadas em dinamômetro, as quais foram repetidas 3 vezes. Para o uso do QSD, foram avaliadas as 13 ferramentas, em apenas uma condição de avanço. No total, os dados compilados foram resultantes de 312 medições de força, 104 filmagens e 13 avaliações com QSD, totalizando 429 ensaios. Devido aos processos de desenvolvimento dos *setups* e elaboração dos dispositivos, os testes preliminares não foram quantificados.

As variáveis de saída quantificadas foram separadas e organizadas no capítulo 4 (Resultados e discussão), em que se buscou evidenciar os comprimentos de contato entre cavaco e ferramenta de corte, verificar as condições de contato registradas na interface de contato do cavaco, bem como observar e quantificar características advindas das filmagens e dos dados adquiridos com o dinamômetro.

Durante os ensaios realizados em corte ortogonal, as ferramentas de corte inicialmente sem texturização, com a presença de uma fina camada de óxido em superfície, foram observadas em microscópio. O comprimento de contato total (l_t) foi medido para as 8 condições de

espessura de corte adotadas, combinado com as 6 diferentes configurações de ferramentas com microrranhura, além da ferramenta de corte convencional. Na mesma condição, apresenta-se o comprimento de contato efetivo (l_{ef}), que se trata do comprimento de contato total (l_t) em relação à aresta de corte subtraído o valor da largura da microrranhura (l_2). O comprimento de contato efetivo (l_{ef}) tem como proposta apresentar o comprimento de contato apenas na superfície de saída, desconsiderando a largura da microrranhura e os efeitos de corte derivativo.

Tomando como base a relação entre posição da microrranhura (l_1) e espessura de corte (t_1), a relação l_1/t_1 é avaliada para as condições com microrranhuras. Não obstante, a relação tradicionalmente apresentada como l/t_1 e $t_1/1$ também é avaliada para ferramentas de contato restrito, bem como para as ferramentas com microrranhuras, fazendo uso do comprimento de contato efetivo (l_{ef}).

Propondo uma comparação entre os comprimentos de contato natural da ferramenta convencional (l_n) e os comprimentos de contato efetivos (l_{ef}) das ferramentas com microrranhura, a razão de contato (r_{ct}) é proposta como indicado na Equação (11). A aplicação da razão de contato r_{ct} poderia mostrar em quais momentos ocorreu a redução do contato se comparada à condição convencional. Ou seja, menores valores de r_{ct} implicam em interferência positiva da microrranhura.

$$r_{ct} = \frac{l_{ef}}{l_n} \quad (11)$$

A sequência da investigação acerca das condições de contato teve como foco observar a região de contato do cavaco com a ferramenta. Amostras obtidas com o corte ortogonal foram, inicialmente, fotografadas com um microscópio do tipo lupa, da marca Biotika, acoplado a uma câmera digital, em ampliações óticas de até 50X. Posteriormente, parte desses cavacos foram observados em microscópio eletrônico de varredura (MEV), em ampliações de até 150X. As imagens MEV foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural, da Universidade Federal de São Carlos, UFSCAR, fazendo uso de um equipamento FEI Inspect, S50. Não obstante, foram realizadas imagens com equipamento modelo EVO LS15, da Carl Zeiss, nas mesmas ampliações, disponível na Faculdade de Ciências da UNESP, Campus Bauru.

Através das filmagens, o grau de recalque foi medido. A relação dada por t_2/t_1 foi realizada por meio de 9 medições realizadas durante a usinagem, desconsiderando o meio segundo inicial e final da filmagem. A medição foi realizada com a importação da imagem no software *Autocad*.

Utilizando o QSD, foram obtidas amostras de cavacos do torneamento fazendo uso das condições de usinagem citadas. As amostras foram seccionadas do tubo e embutidas em baquelite. As micrografias feitas nos cavacos de cobre obtidas com QSD foram realizadas com lixas de 120 a 3000 mesh, seguida por um polimento com pasta de diamante de 9, 6 e 1 μm sucessivamente. Posteriormente, foi realizado ataque por imersão utilizando uma solução com 5g FeCl_3 , 30ml HCl e 100ml H_2O_2 . Após o lixamento e polimento, as amostras embutidas foram limpas em cuba ultrassônica e com ar comprimido, uma vez que a utilização de soprador térmico prejudicou a caracterização das amostras. Após o ataque, foram realizadas imagens em um microscópio ótico da marca Kontrol em ampliações de até 500x.

Por fim, os dados aquistados com dinamômetro foram explorados no software Excel, sendo possível determinar as médias das componentes da força de usinagem em função das variações entre ferramentas de corte e profundidades de corte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresentará os resultados relevantes obtidos durante a investigação deste trabalho, sendo dividido nos seguintes subitens: Condições de contato cavaco-ferramenta; Análise dos cavacos na região de contato com a ferramenta de corte; Observações diretas da formação do cavaco; e Força de usinagem.

4.1 CONDIÇÕES DE CONTATO CAVACO-FERRAMENTA

Neste subitem, são apresentados os resultados obtidos na determinação do comprimento de contato, tanto em relação às ferramentas com microrranhuras quanto às ferramentas de contato restrito, finalizando com a comparação entre as duas condições.

4.1.1 Condições de contato entre cavaco e ferramenta de corte com microrranhura

A dificuldade de predição, e até mesmo da visualização das regiões de contato entre cavaco e ferramenta, é um limitante para o correto projeto das ferramentas de corte com microrranhura, tendo em vista que os modelos atuais de predição não se adequam à aplicação em ferramentas de corte com tais características. Na Figura 49 são mostradas imagens da vista superior da área de contato entre o cavaco e a superfície de saída, em ferramenta convencional, sob diferentes profundidades de corte, obtidas em microscópio ótico.

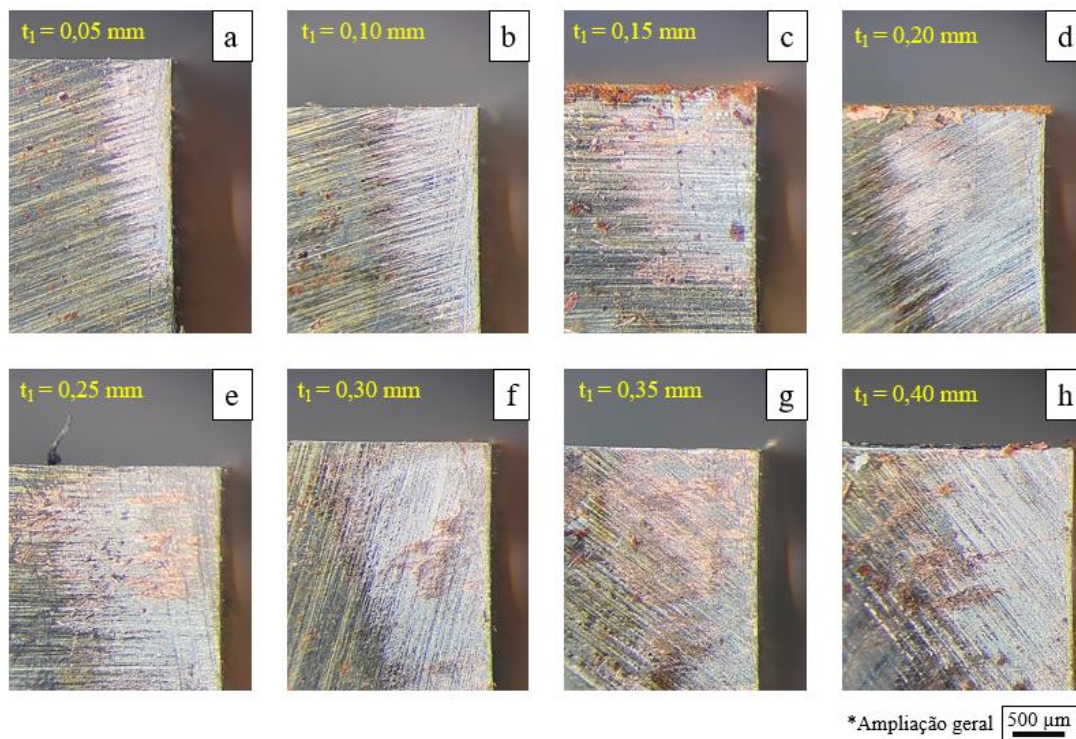


Figura 49: Região de contato do cavaco com ferramenta convencional em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

Na Figura 49, pode ser observado a presença de regiões de aderência e deslizamento com maior clareza em algumas condições do que em outras. Já na Figura 50 são destacadas as regiões características de aderência e deslizamento, baseadas nas informações apresentadas por Doyle et al. e Wright (DOYLE; HORNE; TABOR, 1979; WRIGHT, 1981). As regiões com tons mais claros mostram a região de aderência, caracterizada por uma porção de cavaco com velocidade tendendo a zero, possuindo uma porção superior com movimento relativo. A região de deslizamento, por sequência, apresentou um tom mais alaranjado que a primeira, caracterizado por uma deposição mais grosseira. A observação por macrografia foi mais efetiva que a observação por MEV, tanto com detectores de elétrons secundários ETD (*Everhart-Thornley Detector*) quanto de elétrons retroespalhados BSED (*Backscattered Electrons Detector*). Apesar dessa informação, será verificado ao longo das imagens que a relação da região de aderência e deslizamento pode não ser tão precisa em relação aos comprimentos das zonas 1a, 1b e 2 propostas por Doyle et al. (1981). Dessa forma, as regiões serão tratadas como predominantemente de aderência ou predominantemente de deslizamento. Retornando à Figura 49, é possível determinar que a natureza do contato foi predominantemente aderente, com zonas de deslizamento apenas no fim do contato.

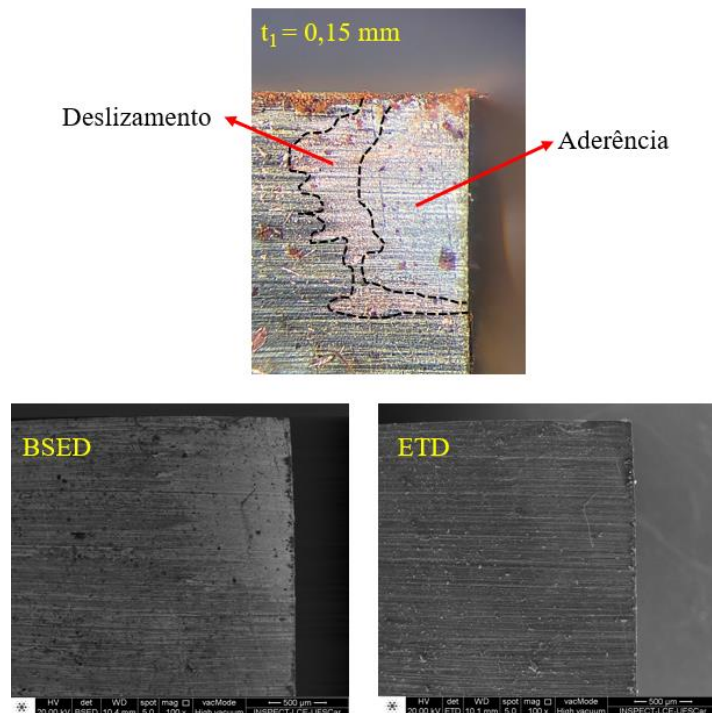


Figura 50: Regiões de aderência e deslizamento para ferramenta convencional ($t_1 = 0,15$ mm)

A mesma investigação foi realizada para as ferramentas de corte com microrranhuras de maior largura ($l_2 = 0,35$ mm), designadas pelo pré-fixo LG, e tendo sua distância em relação à aresta de corte três valores diferentes, correspondentes aos sufixos 0,25, 0,50 e 0,75 mm, isto é: LG0.25, LG0.50 e LG0.75. Como observado na Figura 51, a posição da microrranhura à 0,25 mm da aresta de corte (LG0.25), esteve presente na área de contato em todas as condições. A espessura de corte de 0,05 mm foi a única, dentre todas, que reduziu o comprimento de contato, mesmo assim apresentando corte derivativo. De fato, algumas profundidades de corte produziram regiões de contato com maior característica adesiva, como as representadas na Figura 51g e na Figura 51h, que, apesar de não estarem entupidas por cavacos, não podem ser classificadas como não apresentando corte derivativo.

Uma comparação dos comprimentos de contatos para a ferramenta LG0.25 com a ferramenta de corte convencional é apresentada na Figura 52. A representação da posição e da largura da microrranhura é mostrada com as linhas na cor azul. Como visto, o posicionamento da microrranhura de 0,35 mm de largura aumentou o comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. Ainda na Figura 52, apresenta-se o comprimento de contato efetivo l_{ef} , juntamente ao comprimento de contato total l_t em relação a aresta de corte. Esta comparação

torna-se necessária em função de que tradicionalmente é atribuída a ferramentas de corte texturizadas a capacidade de reduzir o comprimento de contato. Isto posto, tomando como base o comprimento efetivo e sem ainda apresentar a relevância sobre o corte derivativo, os comprimentos de contato foram semelhantes, exceto para a profundidade de 0,05 mm.

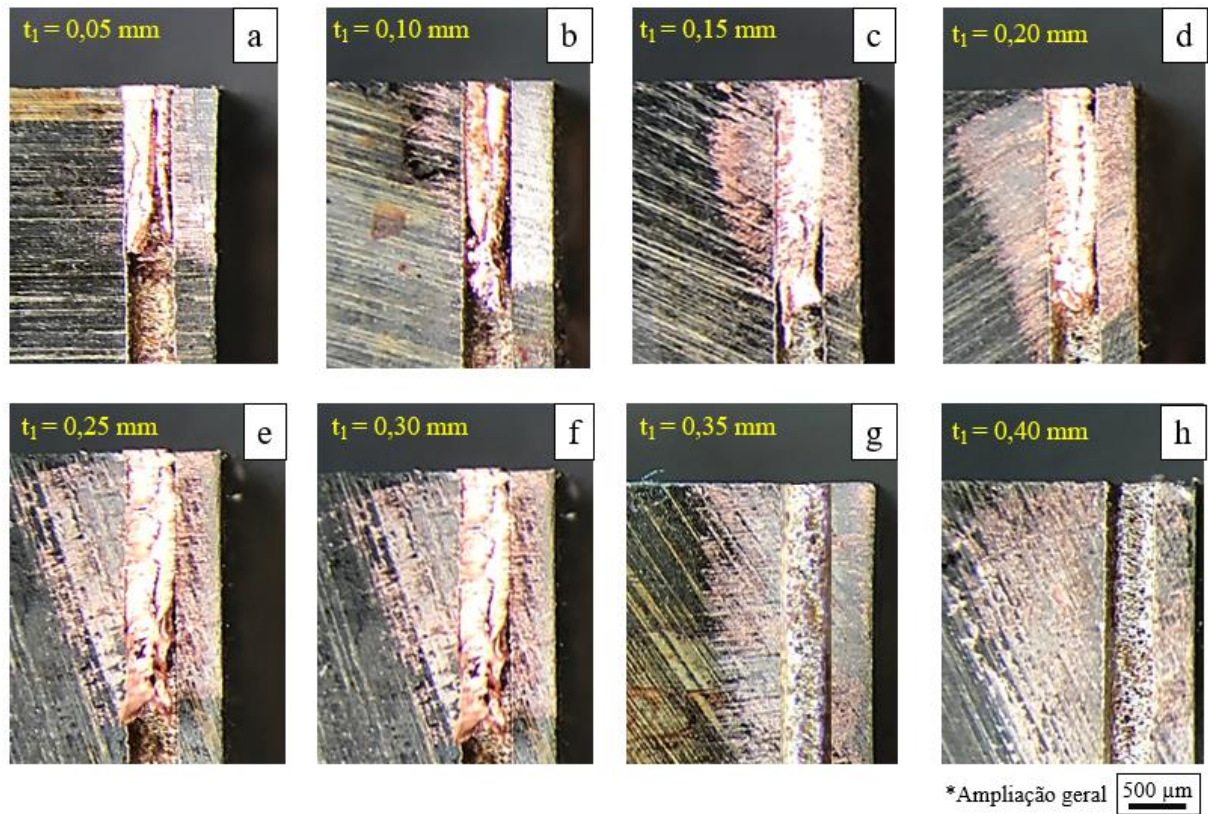


Figura 51: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura LG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

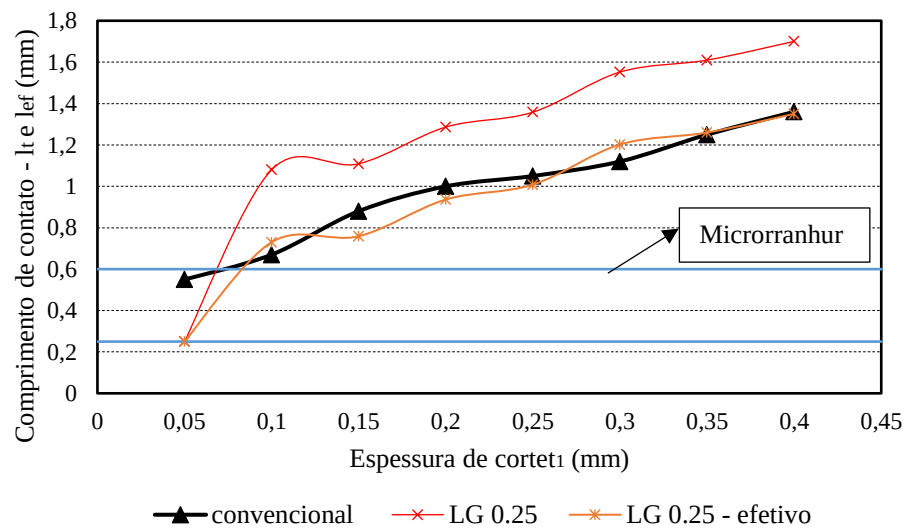


Figura 52: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura LG0.25.

Os comprimentos de contato observados para a ferramenta LG0.50 estão apresentados na Figura 53. Para a profundidade de 0,05 mm, o cavaco apresentou leve contato com a ferramenta na região posterior à microrranhura, enquanto todas as outras apresentaram marcas de contato ultrapassando-o. Cinco das oito condições apresentaram as microrranhuras sem entupimento. Analisando os comprimentos de contato representados na Figura 54, é interessante notar que o comprimento de contato total ultrapassou o comprimento de contato natural da ferramenta convencional em todas as condições, podendo-se inferir que o posicionamento das microrranhuras nesta condição pode não foi ideal para a redução do comprimento de contato. Ao observar visualmente o comprimento de contato efetivo, as condições de espessura de corte de 0,05 e 0,1 mm apresentaram ligeiro aumento do comprimento de contato.

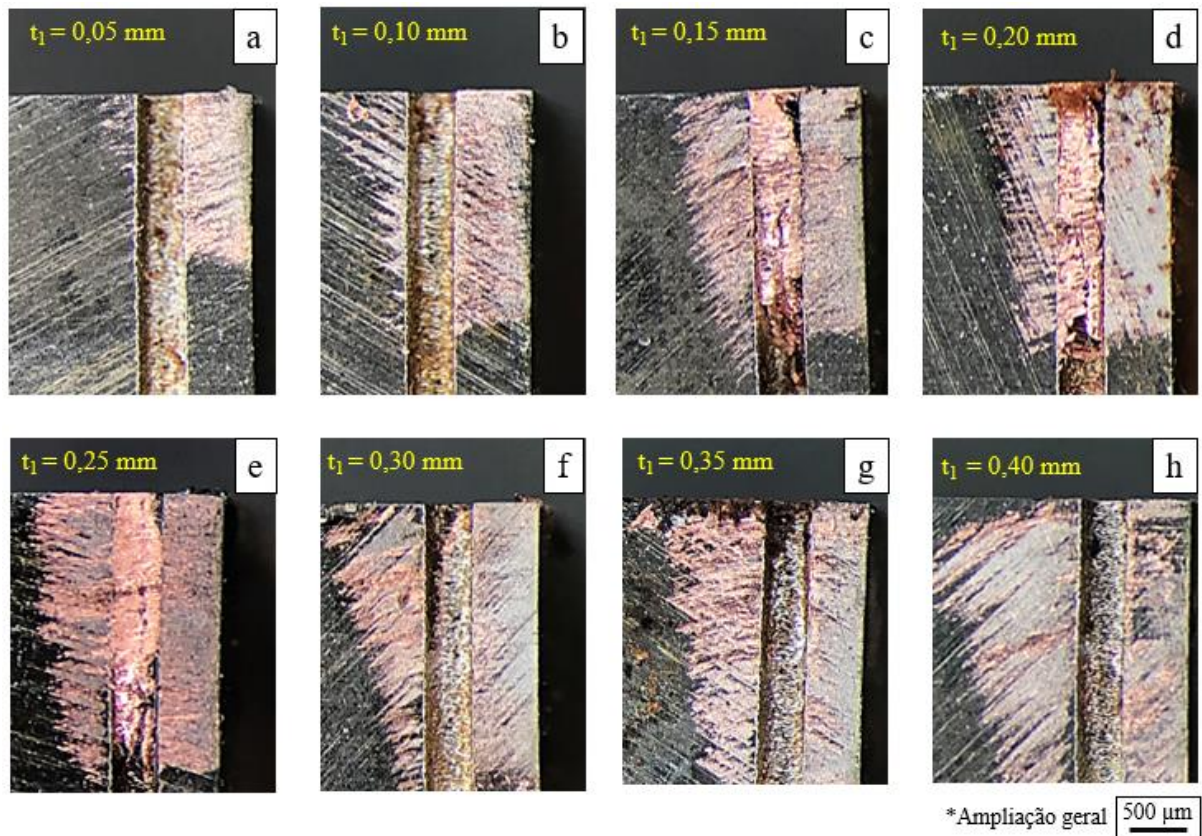


Figura 53: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura LG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

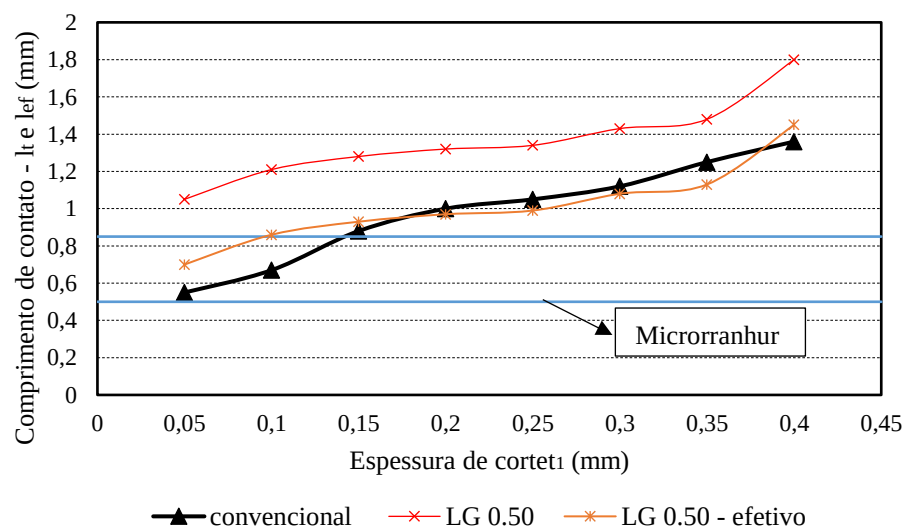


Figura 54: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura LG0.50

Para as ferramentas com microrranhura de 0,35 mm de largura posicionadas a 0,75 mm de distância da aresta de corte, isto é, LG0.75, verifica-se que em todas as condições, o contato do cavaco ultrapassou a posição da microrranhura (Figura 55). Um ponto interessante é o fato de que a menor espessura de corte (0,05 mm) também apresentou aumento no comprimento de contato, devido a interação do cavaco com a microrranhura, provavelmente por causa do corte derivativo que será discutido à frente. Das oito profundidades de corte avaliadas, apenas uma apresentou o preenchimento da microrranhura. Esse preenchimento, tradicionalmente creditado ao corte derivativo, seria responsável por uma piora na condição de usinagem. À primeira vista, então, as demais condições sem microrranhura preenchidas poderiam sugerir que não ocorreu corte derivativo. De antemão, já se adianta que a presença do corte derivativo não pode ser concluída apenas por meio da visualização da ferramenta de corte, sendo necessário a análise do cavaco. Os comprimentos de contato total e efetivo, obtidos com a ferramenta LG0.75, estão representados na Figura 56. Destaca-se que, dentre as ferramentas avaliadas até agora, esta ferramenta foi a que apresentou os maiores comprimentos de contato. Mesmo com o comprimento efetivo, a região de contato entre cavaco e ferramenta tendeu a ser maior que a ferramenta convencional para todas as profundidades de corte.

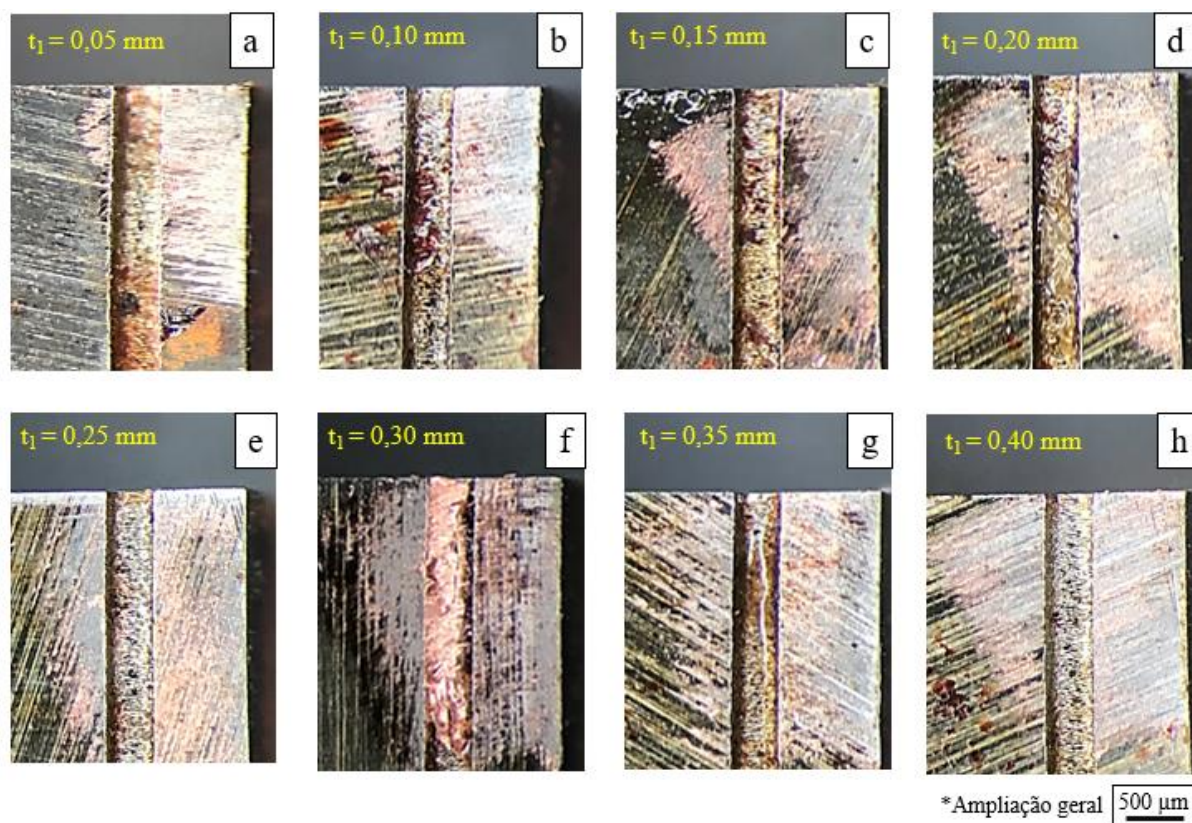


Figura 55: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura LG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

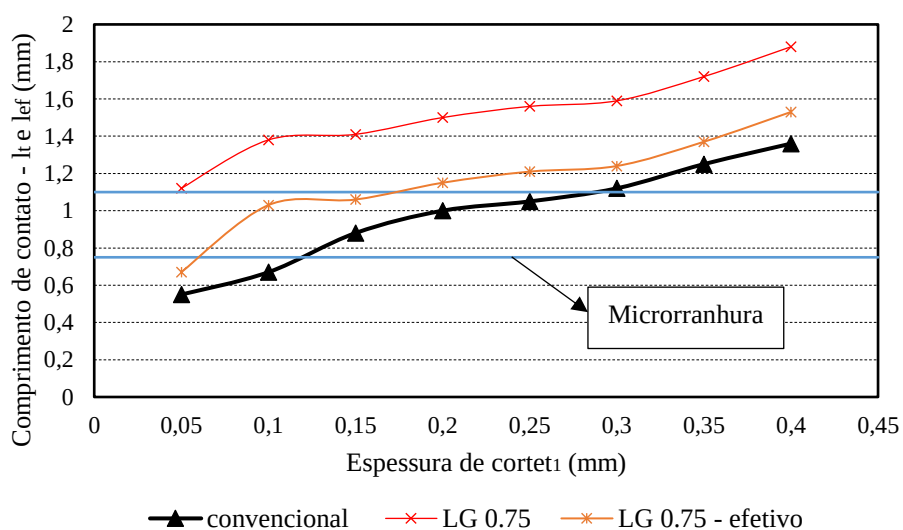


Figura 56: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura LG0.75

As três primeiras ferramentas analisadas contaram com microrranhuras de 0,35 mm de largura, designadas por *large grooves* (LG). Em seguida, serão apresentadas as ferramentas com largura menor de microrranhura, de 0,15 mm, designadas por *small grooves* (SG): SG0.25, SG0.50 e SG0.75. As ferramentas SG0.25 (microrranhura de 0,15 mm de largura posicionada a 0,25 mm da aresta de corte), estão representadas na Figura 57. Exceto a profundidade de 0,1 mm, representado na Figura 57b, todas as profundidades de corte apresentaram preenchimento das microrranhuras. É notado que as profundidades de corte de 0,35 e 0,40 mm preencheram totalmente as microrranhuras, enquanto a ferramenta LG0.25 (Figura 51) não teve as microrranhuras preenchidas nestas duas profundidades de corte. Quanto aos comprimentos de contato, mostrados na Figura 58, as marcas deixadas pelos cavacos foram maiores do que na ferramenta convencional, e, para o comprimento de contato efetivo, o valor tendeu a acompanhar o comprimento observado na ferramenta convencional, exceto pela espessura de corte de 0,10 mm.

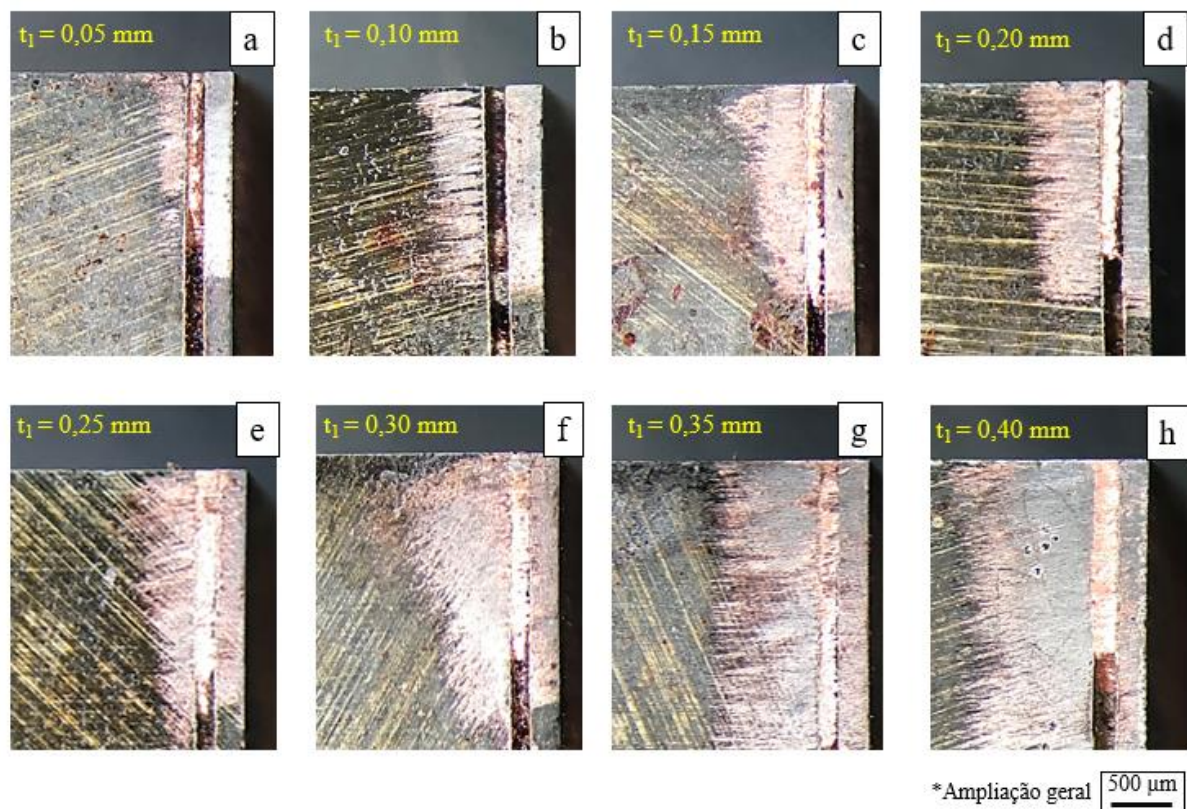


Figura 57: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura SG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

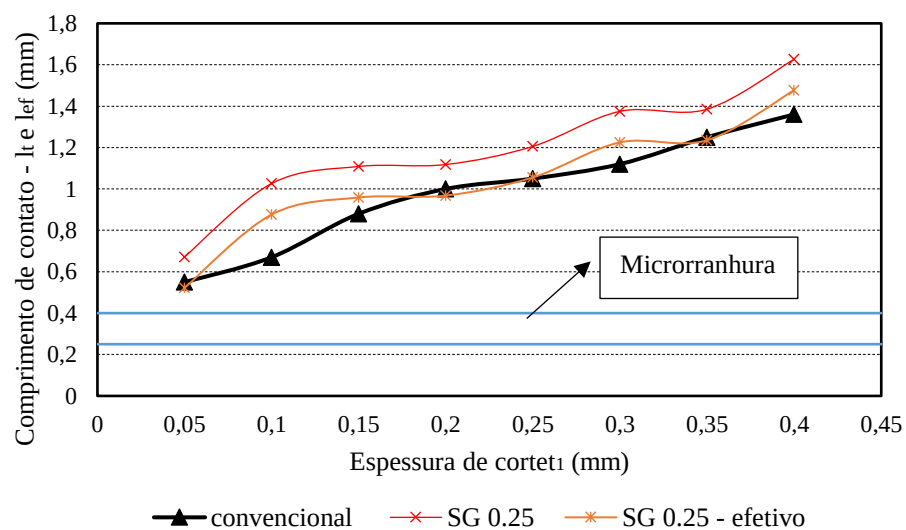


Figura 58: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura SG0.25.

Durante a usinagem com a ferramenta de corte SG0.50, foram registradas as imagens apresentadas na Figura 59. Semelhante à ferramenta LG0.50 (Figura 54), as profundidades de corte 0,05 e 0,10 mm não produziram preenchimento, enquanto nas profundidades de corte de 0,15 e 0,20 mm, foram observados indícios de entupimento com cavaco. Nas profundidades de corte de 0,25 a 0,40 mm, maiores preenchimentos foram observados se comparados ao que ocorreu com a ferramenta LG0.50, com severo entupimento nas profundidades de corte de 0,35 e 0,40 mm. Tendo em vista os comprimentos de contato apresentados na Figura 60, é possível determinar que os comprimentos de contato, total e efetivo, superaram os comprimentos da ferramenta convencional, exceto para a condição efetiva com a espessura de corte de 0,05 mm.

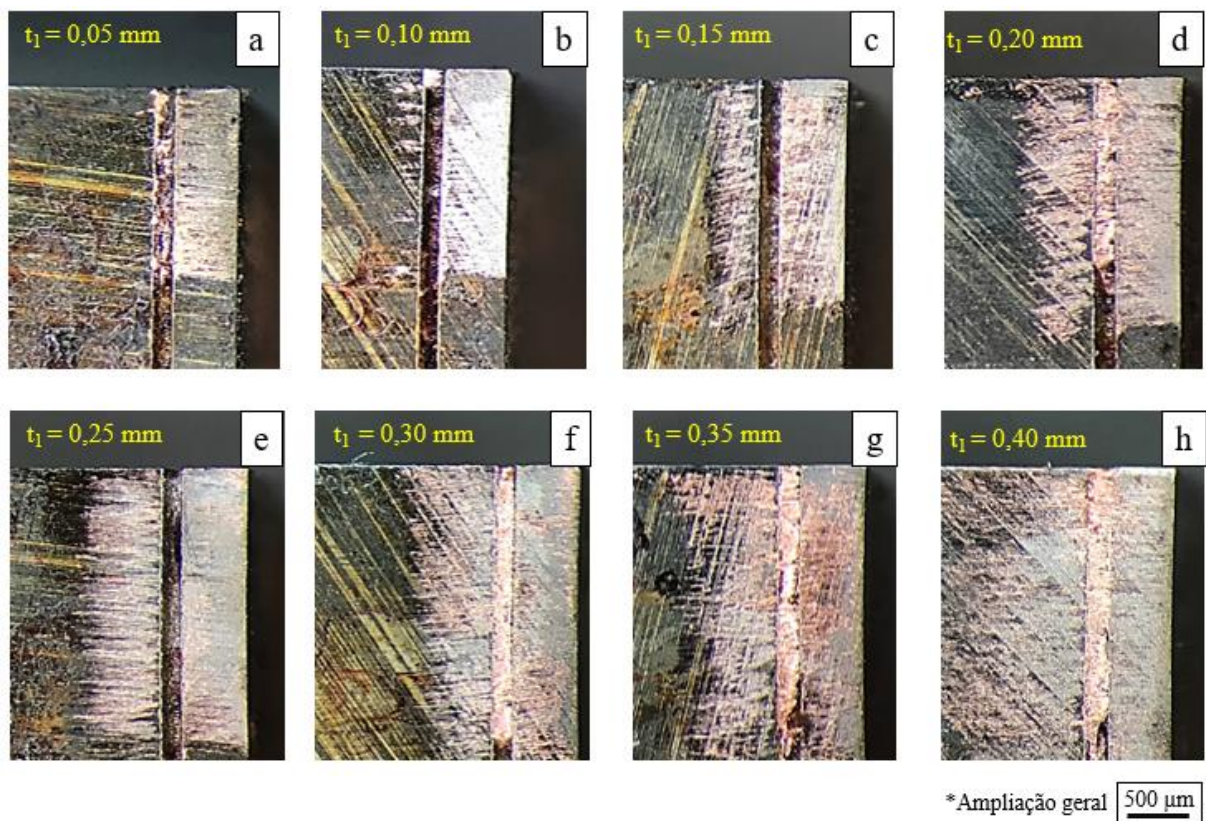


Figura 59: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura SG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

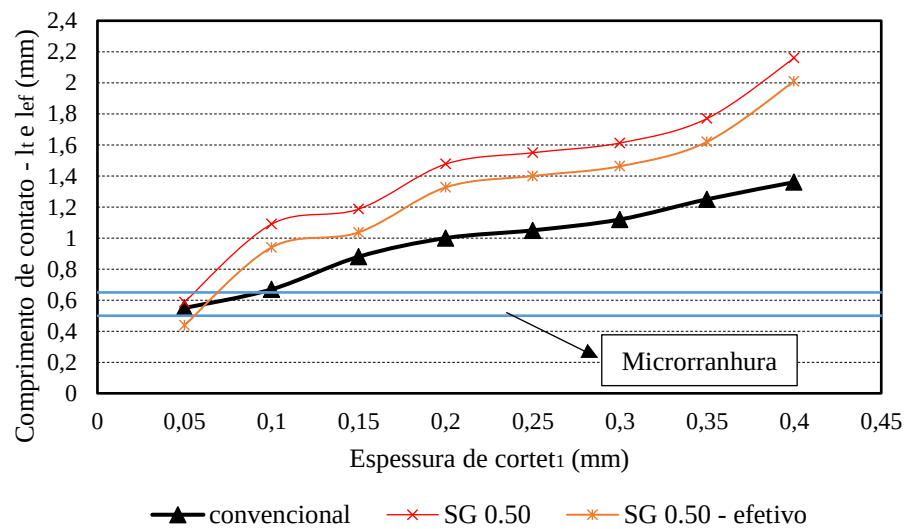


Figura 60: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura SG0.50.

Mesmo com a microrranhura posicionada a 0,75 mm da aresta de corte, a modificação da ferramenta SG0.75 pode influenciar na região de contato. A Figura 61 mostra as regiões de contato durante a usinagem. A menor espessura de corte, 0,05 mm, não foi afetada pela presença da microrranhura. Diferente da ferramenta LG0.75, que apresentou apenas entupimento na profundidade de 0,30 mm, a condição SG0.75 apresentou presença de cavaco dentro das microrranhuras nas condições 0,30 a 0,40 mm de espessura de corte em menor intensidade em 0,15 e 0,20 mm de espessura de corte. Os comprimentos de contato, mostrados na Figura 62, também superaram o comprimento de contato da condição sem textura, mesmo no comprimento efetivo, exceto pela profundidade de 0,05 mm que não foi afetada pela microrranhura. De fato, esse posicionamento de microrranhura, junto com a condição a condição SG0.50, destoaram do comprimento de contato sem textura, se comparado ao comprimento de contato da condição LG0.75.

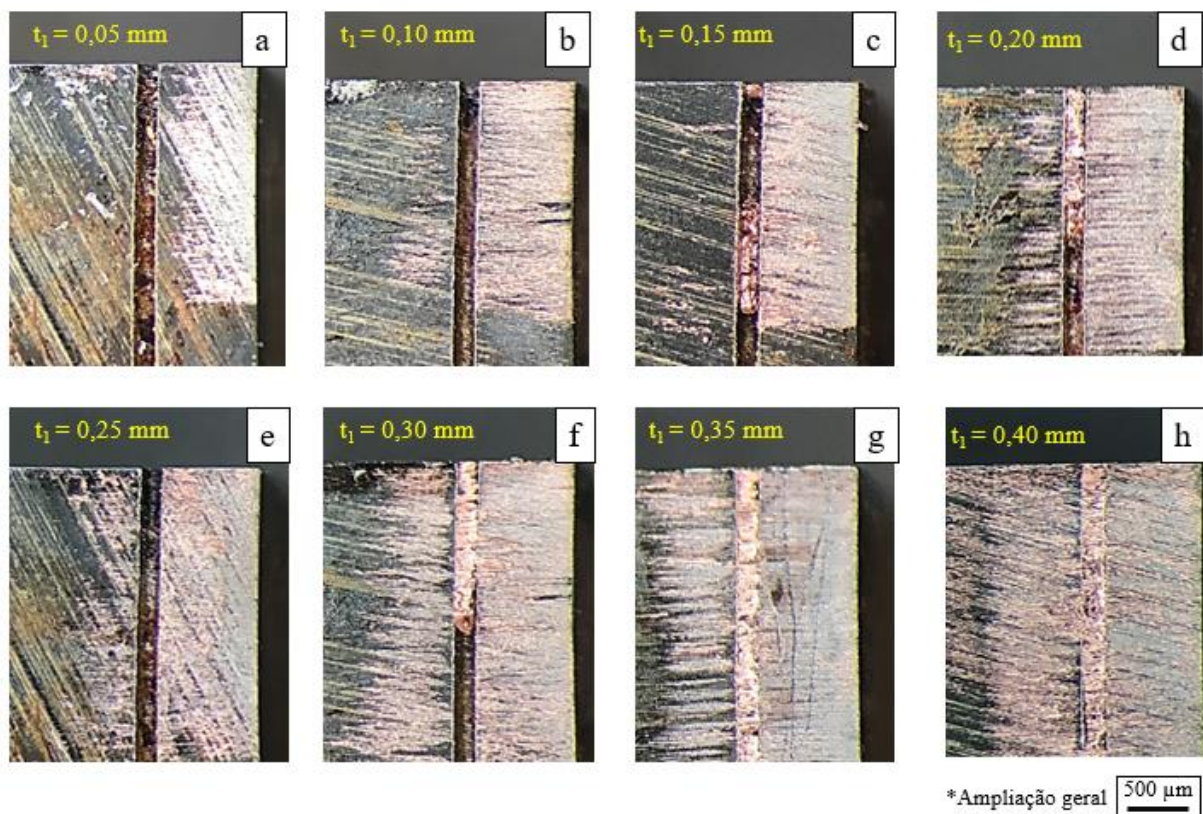


Figura 61: Região de contato do cavaco com ferramenta com microrranhura SG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

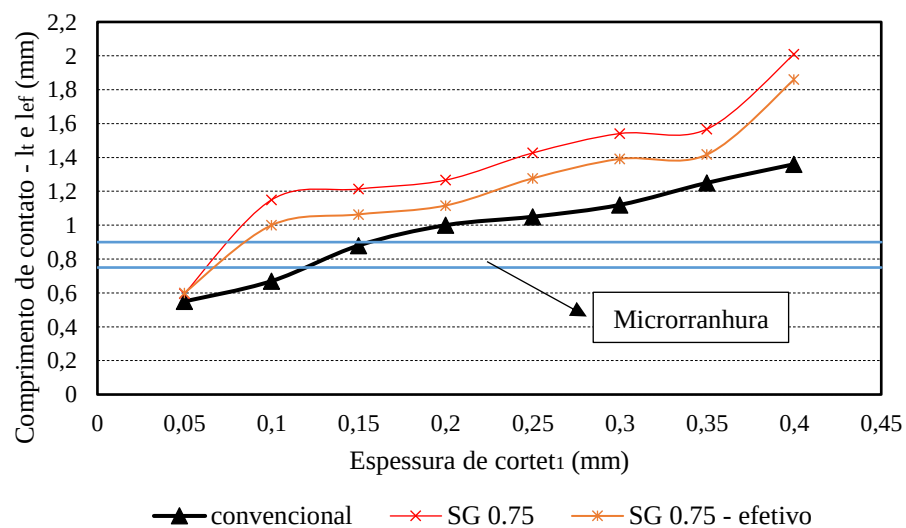


Figura 62: Comprimento de contato para a ferramenta convencional e com microrranhura SG0.75.

Tomando como referência a medição do comprimento de contato deixado pelo cavaco, observou-se que a grande maioria das ferramentas de corte microrranhurada apresentado neste trabalho obtiveram maiores comprimentos de contato se comparadas ao corte natural das ferramentas convencionais. Em relação ao comprimento de corte efetivo, observou-se que as ferramentas LG0.25, LG0.50 e SG0.25 tiveram comprimentos de corte efetivos semelhante às ferramentas convencionais. De fato, grande parte da bibliografia tradicional, como apresentados nas revisões de Sharma e Pandey (2016) e Arslan et al. (2016) sobre ferramentas texturizadas considera que a presença da textura reduzi o comprimento de contato, como mostrado na Figura 63 e que a redução da força de usinagem e temperatura, ao lado do aumento da vida da ferramenta, estaria correlacionado principalmente a este fator. De acordo com esta teoria, o comprimento de contato total poderia ser reduzido subtraindo-se a largura das microrranhuras do comprimento natural. No entanto, o comprimento efetivo nas ferramentas com microrranhuras mostrado aqui, indica que essa correlação não é verdadeira em todas as condições.

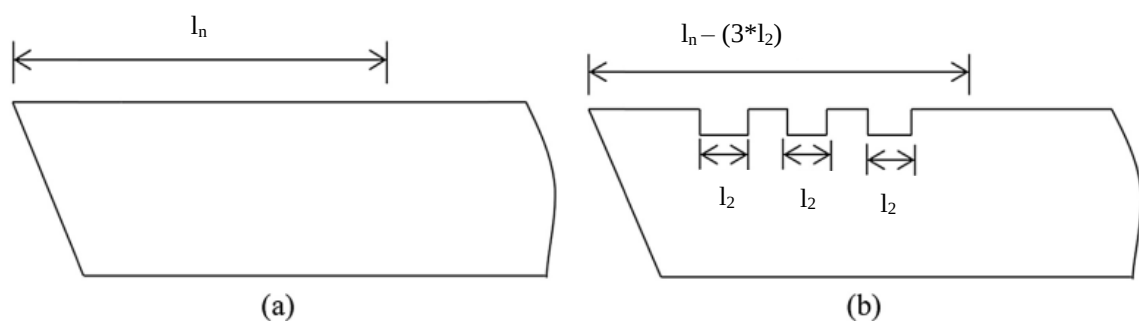


Figura 63: Relação entre (a) comprimento total natural e (b) comprimento total com microrranhuras. Adaptado de Sharma e Pandey (2016).

Para que as ferramentas texturizadas pudessem de fato se comportar como ferramentas que reduzem a área de contato, o cavaco deveria ser considerado como um corpo rígido, o que não é coerente se analisarmos a interface de contato. As altas tensões de compressão nessa região podem fazer com que haja a tendência de entupimento das microrranhuras por deformação e por corte derivativo. Isto posto, para que as ferramentas texturizadas possam se comportar como ferramentas de contato restrito, é necessário que as microrranhuras estejam corretamente posicionadas na interface de contato e que possuam geometrias que diminuam o contato entre cavaco e aresta da microrranhura.

Como visto, o contato entre cavaco e ferramenta, nas condições avaliadas, apresentou maiores características de aderência, com aspecto de deslizamento em pequenas regiões ao final da área de contato. Com essa consideração, o posicionamento das microrranhuras dentro das regiões de maior tensão favorece o preenchimento da microrranhura, por causa da ação conjunta do aumento do corte derivativo e tensão de compressão, sendo ainda piorado pela geometria da aresta da microrranhura, tal como apontado por Duan et al. (2018a).

Em relação aos dados apresentados por Sugihara et al. (2021), os autores mostram a presença de 3 regiões apresentadas frente as áreas de contato. A região 1 é considerada indiferente à presença de microrranhura, tendo em vista que a região de contato aderente não atingiu o posicionamento da mesma. A região 2 é benéfica, tendo a parte final da região de contato alcançado a microrranhura, enquanto a região 3 foi prejudicial, uma vez que a região de aderência ultrapassou em grande parte a posição da microrranhura. Desta forma, a análise da posição da microrranhura em relação à espessura de corte (l_1/t_1) pode ser proposta. Apesar dos autores não terem apresentado tal estudo, a Tabela 8 apresenta as relações que podem ser extraídas de Sugihara et al. (2021), enquanto a Tabela 9 apresenta as condições obtidas nesta pesquisa.

Tabela 8: Relação entre posição da microrranhura e espessura de corte (l_1/t_1) calculado de Sugihara et al. (2021)

Região 1	Região 2	Região 3
Sem efeito	Melhor condição	Pior condição
$l_1/t_1 = 6,67$ a $3,3$	$l_1/t_1 = 2$	$l_1/t_1 = 1,33$

Tabela 9: Relação (l_1/t_1) neste trabalho.

Posição da microrranhura, l_1 (mm)	Espessura de corte, t_1 (mm)								
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	
0,25 (LG0.25 e SG0.25)	5,00	2,50	1,67	1,25	1,00	0,83	0,71	0,63	l_1/t_1
0,50 (LG0.50 e SG0.50)	10,00	5,00	3,33	2,50	2,00	1,67	1,43	1,25	
0,75 (LG0.75 e SG0.75)	15,00	7,50	5,00	3,75	3,00	2,50	2,14	1,88	

* em azul: condições dentro da região 2 proposta por Sugihara et al. (2021).

* em vermelho: condições dentro da região 3 proposta por Sugihara et al. (2021).

Mesmo que o trabalho de Sugihara et al. (2021) tenha sido realizado em uma liga de alumínio, a comparação é relevante a fim de verificar padrões coincidentes que permitam o desenvolvimento de ferramentas de corte para diversas condições. Apresentado na Tabela 9, o posicionamento das microrranhuras a 0,25 mm da aresta de corte apresentaria sua melhor condição na faixa de 0,10 a 0,15 mm de espessura de corte, enquanto o posicionamento de 0,50 mm da aresta de corte teria sua melhor condição em 0,25 mm de espessura de corte e a posição de 0,75 mm, teria sua melhor condição tendendo a iniciar a partir de 0,4 mm de espessura de corte. Tais condições encontram-se grifadas em azul na Tabela 9, enquanto as condições compatíveis à região 3 estão em vermelho.

É interessante mencionar que a relação (l_1/t_1) também foi empregada por Kishawy (2021). Sugihara et al. (2021) manteve a posição da microrranhura e alterou os valores de t_1 no corte ortogonal, enquanto Kishawy (2021) manteve (t_1), considerando um avanço fixo de 0,1 mm/volta no torneamento, variando as posições das microrranhuras em relação à aresta de corte. Apesar de ter utilizado mais de uma microrranhura, a pior condição apresentada na Tabela 4, apresenta uma relação $l_1/t_1 = 0,5$, enquanto a melhor condição apresenta uma relação $l_1/t_1 = 2$, condizente com a região ótima de Sugihara.

No entanto, o artigo de Sugihara et al. (2021) aponta a presença apenas de corte derivativo na região 3, destoando dos resultados obtidos neste trabalho, uma vez que há indícios de preenchimento das microrranhuras nas condições relacionadas à região 1 e 2. É de se considerar que as microrranhuras utilizadas por Sugihara apresentavam 100 μm de largura, juntamente a um ângulo de saída de 10° , enquanto aqui as microrranhuras apresentam larguras de 150 e 350 μm , juntamente a um ângulo de saída nulo, indicando mais pontos que podem influenciar o corte derivativo.

4.1.2 Condição de contato entre cavaco e ferramentas de contato restrito

As ferramentas de contato restrito avaliadas demonstraram os comprimentos de contato apresentados na Figura 64. Tendo em vista que o comprimento da superfície de saída restringe o contato entre cavaco e ferramenta, os comprimentos de contato são tratados como totais. O controle de comprimento da superfície de saída da ferramenta de corte permitiu a restrição mínima no comprimento de contato (RC0.25) até a condição que a ferramenta de contato restrito pudesse se comportar de fato como a ferramenta convencional (RC1.50), tendo contato

natural. Na Figura 65 são mostrados os valores entre a razão (t_1/l) e a espessura de corte para as ferramentas de contato restrito entre RC0.25 a RC1.50.

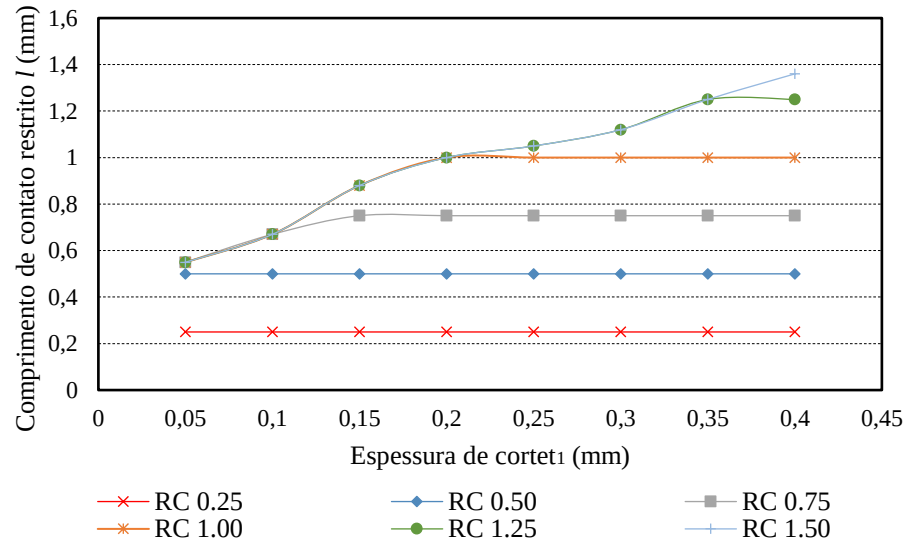


Figura 64: Comprimentos de contato nas ferramentas de contato restrito em função da espessura de corte .

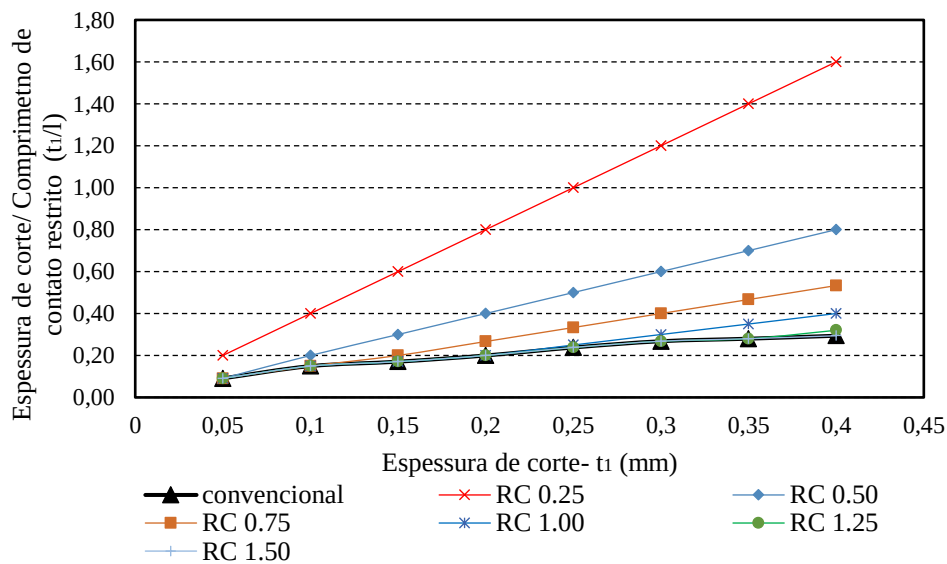


Figura 65: Relação (t_1/l) em diferentes ferramentas de contato restrito e na ferramenta convencional em função da espessura de corte .

Ainda sobre a Figura 65, é visível o decréscimo da relação (t_1/l) em função do aumento do comprimento da superfície de saída. Em função desse decréscimo, a ferramenta RC1.50 apresenta o comportamento de uma ferramenta convencional, mostrando que o comprimento

de 1,5 mm de sua superfície de saída permitiu que a ferramenta se comportasse como uma ferramenta convencional para todas as condições de usinagem, apresentando comprimento de contato natural.

4.1.3 Condições de contato em ferramentas com microrranhura e ferramentas de contato restrito

Torna-se interessante, agora, notar possíveis similaridades do contato do cavaco com as ferramentas com microrranhura e de contato restrito, dado que estas primeiras também restringem o contato no seu comprimento (l_1).

A relação (t_1/l_{ef}) obtidas durante a usinagem com ferramentas com microrranhura é apresentada na Figura 66, para qual o valor do comprimento de contato é o efetivo. Diferentemente do comportamento linear observado nos dados obtidos com as ferramentas de contato restrito, as ferramentas com microrranhura têm, no geral, uma tendência de aumento dessa relação em função do aumento da espessura de corte, variando a inclinação das curvas em função desse aumento. Kishawy et al. (2021) apresenta a relação (l_t/t_1) , para a qual l_t representa o comprimento de contato total entre cavaco e ferramenta de corte. Nessa investigação, esse comprimento é dado em função de simulação por meio do *software* Abaqus, no qual é citado que a melhor condição com microrranhuras teve redução no comprimento de contato. Apesar da informação, os autores não comparam tal comprimento de contato com a ferramenta sem microrranhuras. Tendo sido apresentados os resultados relativos ao comprimento de contato medidos experimentalmente neste trabalho, é identificado o aumento do comprimento de contato medido em relação à aresta de corte para praticamente todas as condições, ao passo que o comprimento efetivo teve valores iguais ou ligeiramente menores se comparados à ferramenta convencional.

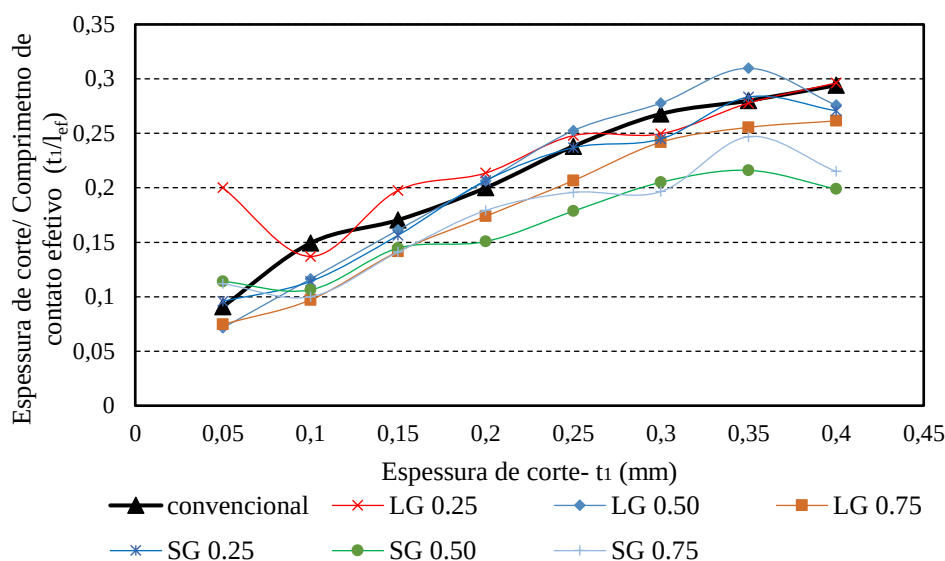


Figura 66: Relação (t_1/l) para as ferramentas com microrranhura e ferramenta convencional.

Considerando as condições de contato medidas até aqui, a relação t_1/l ou l/t_1 aplicada a ferramentas com microrranhura não foi tão palpável quanto essa relação aplicada às ferramentas de contato restrito, tendo em vista que não se identifica um comportamento no qual permite associar o posicionando da microrranhura à redução do comprimentos de contato. Dada a dificuldade para medições diretas na superfície de saída, a relação l_1/t_1 poderia trazer informações mais claras quanto a relação do corte derivativo.

Outra possibilidade poderia se dar na exploração do comprimento de contato da ferramenta convencional (l_n) com o comprimento de contato da ferramenta de contato restrito, assim como (l_n) com o comprimento de contato efetivo (l_{ef}) das ferramenta com microrranhura empregando a razão de contato (r_{ct}) apresentada na Equação (11).

A razão de contato para ferramentas de contato restrito, Figura 67, é capaz de mostrar que valores abaixo da unidade compreendem situações com ocorrência de restrição de contato. A ferramenta RC1.50, mostra-se com comportamento de uma ferramenta convencional, ao passo que as outras ferramentas restritas gradualmente atingem o contato natural, com restrição da ferramenta RC0.25 que para todas as profundidades de corte é capaz de restringir o contato. Além da citada, as ferramentas RC0.50 e RC0.75 são as que mais restringem o contato para as dadas profundidades de corte, seguidas pela RC1.00. A ferramenta RC1.25, por sua vez, restringe em pouco o contato apenas na espessura de corte de 0,40 mm. Se comparada a Figura 64, a Figura 67 não mostra grandes novidades, mas, a sua comparação com as ferramentas com

microrranhura mostrará de uma maneira mais clara em quais situações a ferramenta com microrranhura pode gerar menor contato com a superfície de saída.

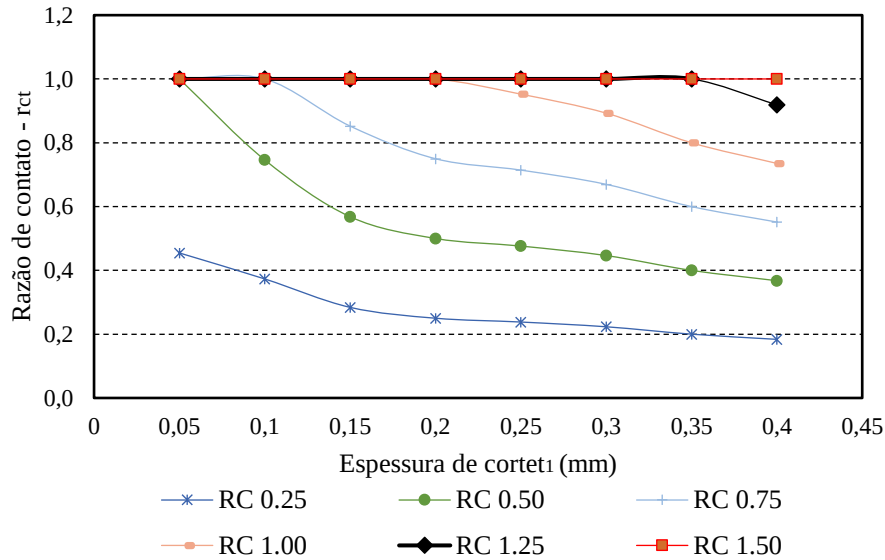


Figura 67: Razão de contato (r_{ct}) para ferramentas de contato restrito.

Para tal comparação, se toma a relação da distância da aresta de corte até a restrição de contato, seja por microrranhura (l_1) ou por restrição da superfície de saída (l). A Figura 68 apresenta os dados da razão de contato (r_{ct}) para as ferramentas LG0.25, SG0.25 e RC0.25. A razão de contato mostra que a partir de 0,20 mm de espessura de corte, as ferramentas LG0.25 e SG0.25 apresentam um comportamento similar, tendendo à valores próximos da razão de contato convencional. Por outro lado, considerando o comprimento de contato efetivo, a ferramenta LG0.25 foi comparável à ferramenta RC0.25, enquanto a ferramenta SG0.25 mostrou pequena redução, em parte explicada pelo comprimento efetivo que desconta a largura da microrranhura do comprimento total. Além disso, a espessura de corte de 0,10 mm produziu um aumento de contato para ambas as ferramentas com microrranhura.

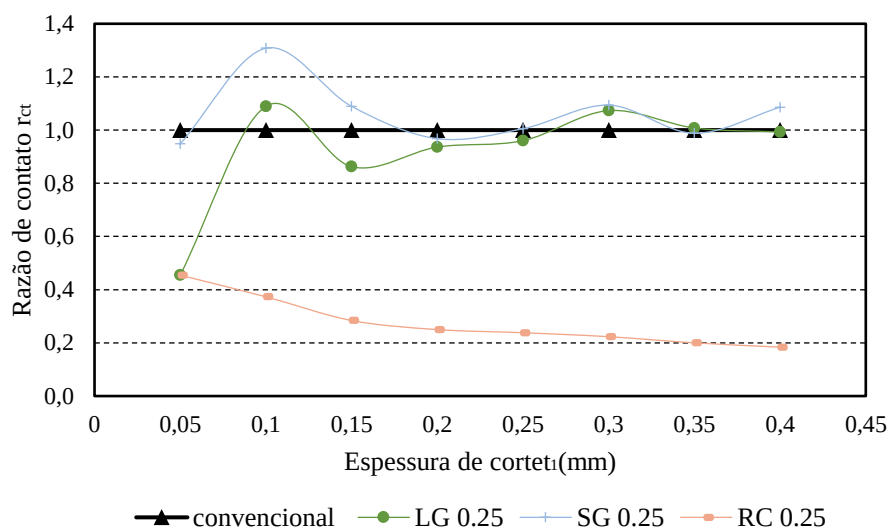


Figura 68: Razão de contato (r_{ct}) para as ferramentas LG0.25, SG0.25 e RC0.25.

Na mesma metodologia de análise, as ferramentas com distância da aresta de corte (l_1) de 0,50 mm até a alteração da superfície de saída são mostradas na Figura 69, em que foram empregadas as ferramentas LG0.50, SG0.50 e RC0.50. Para esta condição, a ferramenta SG0.50 apresentou uma razão de contato (r_{ct}) superior a unidade em todas as profundidades de corte, exceto a de 0,05 mm, a qual reduziu o contato efetivo na ferramenta RC0.50. Quanto à ferramenta LG0.50, houve tendência de equilíbrio da razão de contato próximo a unidade, a partir da profundidade de 0,15 mm.

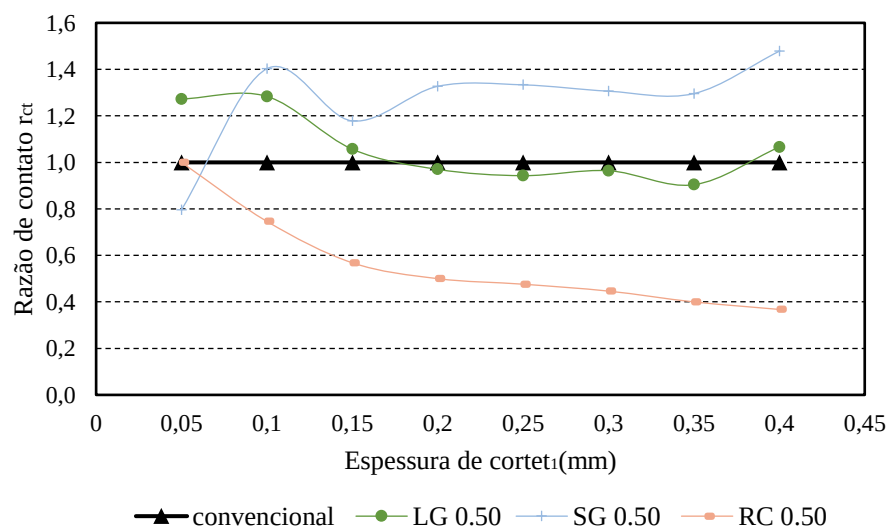


Figura 69: Razão de contato (r_{ct}) para as ferramentas LG0.50, SG0.50 e RC0.50.

A distância (l_1) de 0,75 mm da aresta de corte, obtida com as ferramentas LG0.75, SG0.75 e RC0.75, gerou as razões de contato (r_{ct}) apresentadas na Figura 70. A razão de contato mostra que o posicionamento das microrranhuras à 0,75 mm da aresta de corte produziu aumento no contato para ambas as ferramentas, exceto para a ferramenta SG0.75 na espessura de corte de 0,05 mm. Ao longo das profundidades de corte, a ferramenta com microrranhura mais estreita (SG) apresentou tendência de aumento de (r_{ct}) em relação à microrranhura mais larga (LG).

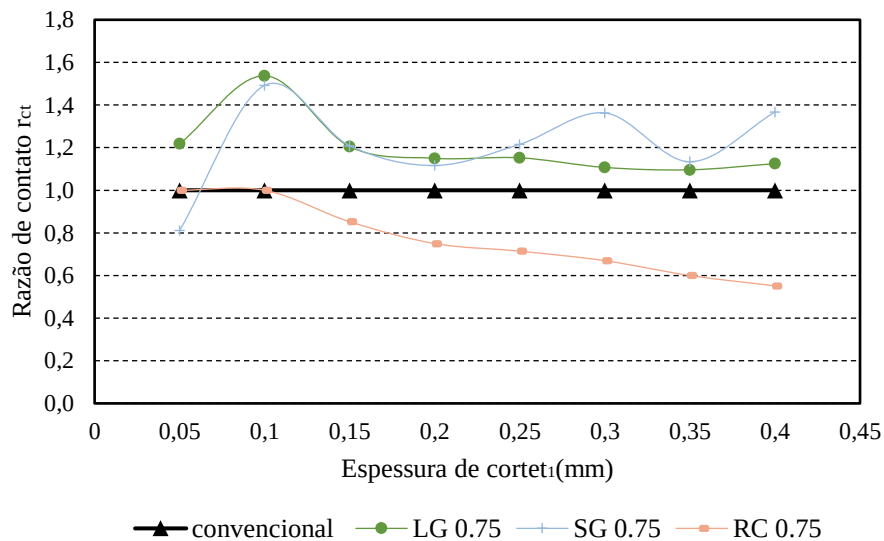


Figura 70: Razão de contato (r_{ct}) para as ferramentas LG0.75, SG0.75 e RC0.75.

Comparando a Figura 68 com a Figura 69 e Figura 70, algumas considerações podem ser tecidas. É verificado que as microrranhuras de 0,35 mm de largura (LG) puderam gerar menores comprimentos de contato se comparados às microrranhuras de 0,15 mm de largura (SG). Com o posicionamento da microrranhura (l_1) a 0,25 mm da aresta de corte, as microrranhuras SG e LG apresentaram comprimentos de contato semelhantes a partir de 0,20 mm de espessura de corte, que representa um valor (l_1/t_1) de 1,25, já presente na região 3 de Sugihara et al. (2021). Em sequência, a posição (l_1) de 0,50 mm da microrranhura, na espessura de corte de 0,20 mm ($l_1/t_1 = 2,5$), permitiu um comprimento de contato menor com a microrranhura do tipo LG. Por fim, o posicionamento da microrranhura a 0,75 mm da aresta de

corte ($l_1=0,75\text{mm}$), gerou a tendência de aumento de comprimento de contato para praticamente todas as condições.

Diante dessas informações, e considerando as regiões de deslizamento preferencialmente ao final das regiões de contato, infere-se que o posicionamento da microrranhura na região de aderência poderia ser mais relevante do que na região de deslizamento, do ponto de vista de comprimentos de contato. Somado a isso, a microrranhura com maior largura gera, no geral, menor comprimento de contato que as microrranhura mais estreitas.

4.2 ANÁLISE DOS CAVACOS

As ferramentas de corte modificadas por microestruturas, como as ferramentas com microrranhuras e texturas, têm se mostrado capazes de mudar os mecanismos de formação de cavaco, embora essas informações ainda não sejam disponíveis na literatura ao ponto de esclarecer totalmente os fenômenos envolvidos.

4.2.1 Formação de cavaco em ferramenta de corte com microrranhura

No estudo do contato cavaco-ferramenta nos itens anteriores deste capítulo, notou-se que em algumas condições as microrranhuras apresentaram-se vazias, o que, no entanto, não é suficiente para concluir sobre a ausência ou presença do corte derivativo.

A Figura 71 representa todos os cavacos obtidos no corte ortogonal com ferramenta convencional. A variação da espessura de corte permitiu que os cavacos aumentassem ligeiramente sua largura durante a usinagem. Além disso, em todas as condições há um dos lados do cavaco que aparenta aspecto mais regular, isto devido a compressão lateral gerada pelo vidro no instante da usinagem e filmagem. Ainda nesta figura, é possível identificar as marcas de acabamento da ferramenta de corte numa das extremidades do cavaco. Shaw (2005), citando que Zorev (1963), aponta que marcas de acabamento da ferramenta de corte ficam impressas na região de aderência, diferenciando essa região do restante do cavaco.

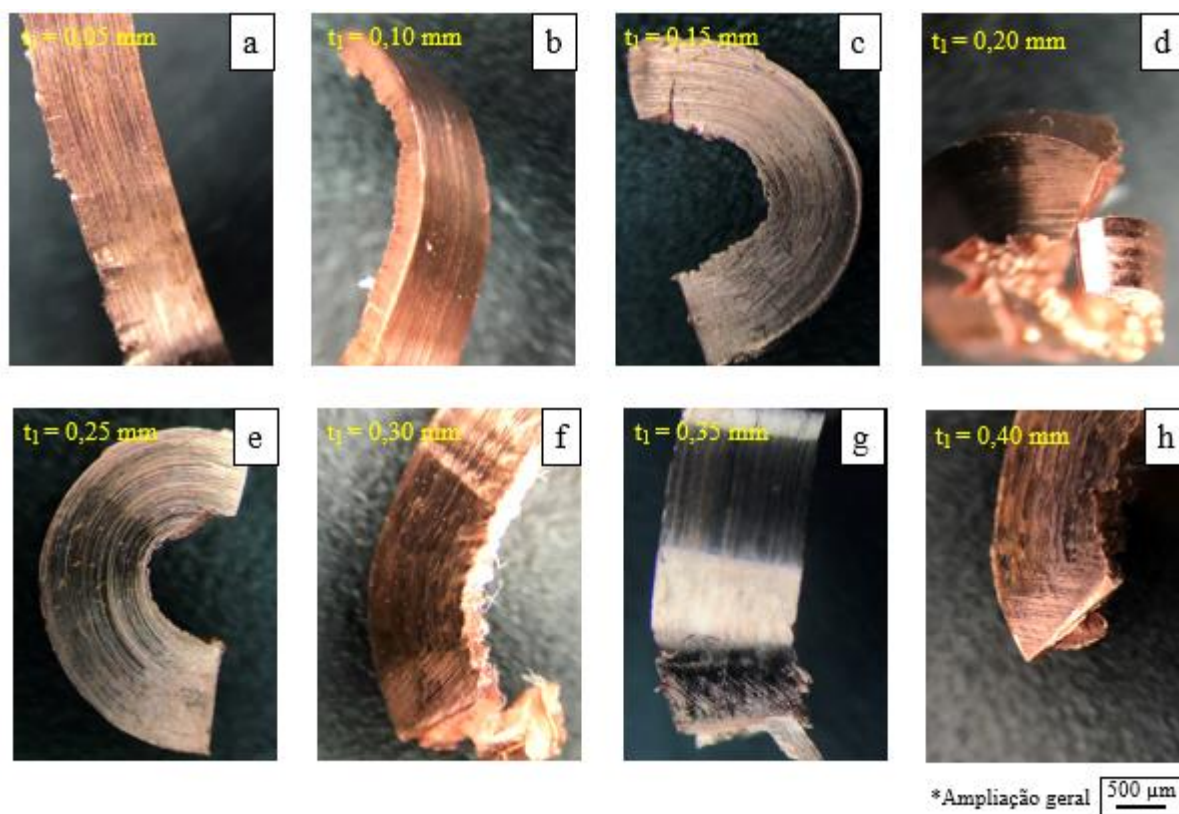


Figura 71: Microscopia da parte inferior do cavaco formado com ferramenta convencional, para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

A Figura 72 apresenta as imagens obtidas por MEV para a condição convencional. Nota-se que o padrão impresso nos cavacos é variado, e, de fato, a orientação das marcas de acabamento deixadas pelo processo de retificação na superfície da ferramenta apresentou diferentes orientações em função da amostra de ferramenta de corte.

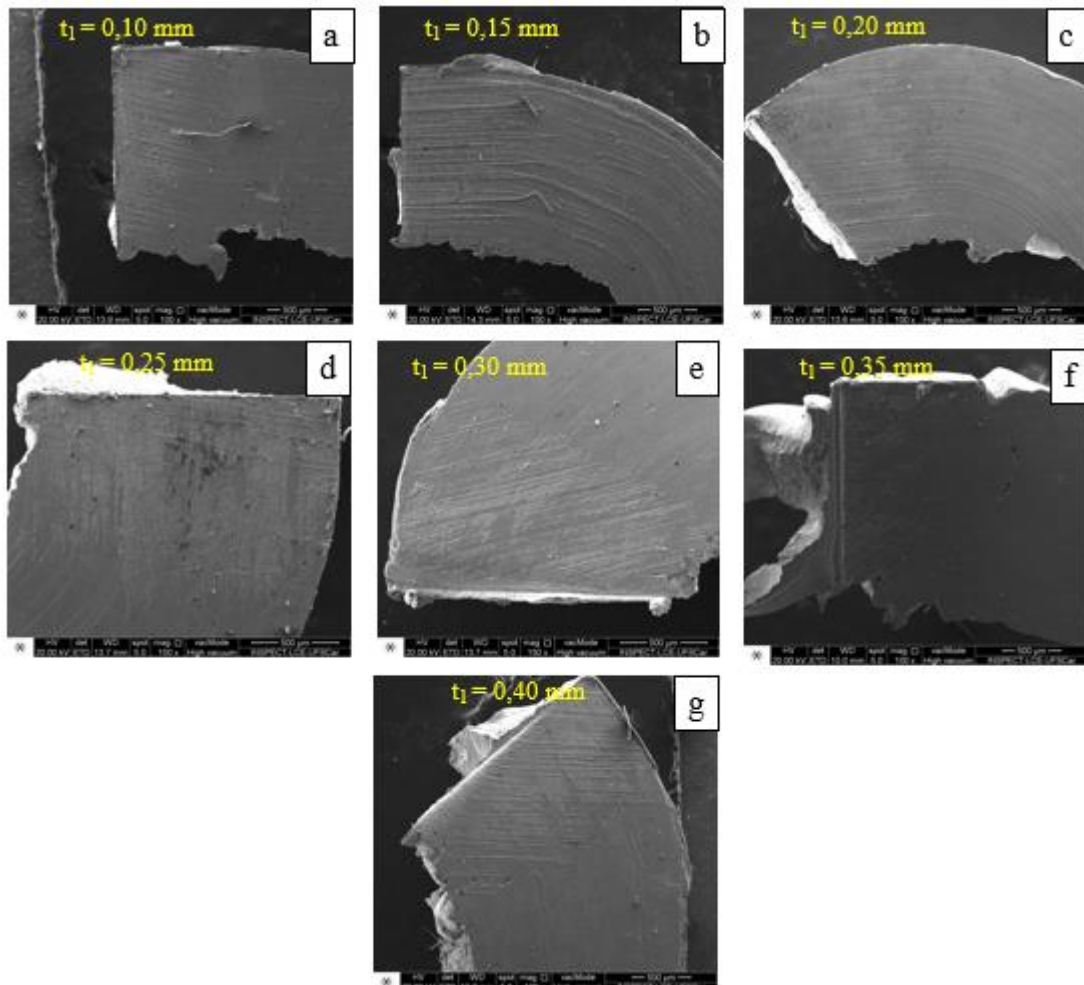


Figura 72: MEV da parte inferior do cavaco formado em ferramenta convencional para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

Nessas observações, foi possível validar o comportamento predominantemente de aderência para as dadas condições. Todavia, de uma maneira mais clara, é possível observar na Figura 73 que nas proximidades da aresta de corte a adesão é predominante e que conforme se aumenta a distância em relação à aresta adentra-se na zona de transição entre aderência e deslizamento. Isto tendo sido mostrado, corrobora-se a existência das zonas 1a em pequena magnitude, zona 1b em quase a totalidade do contato e zona 2, de deslizamento, em pequenas proporções, nas condições avaliadas.

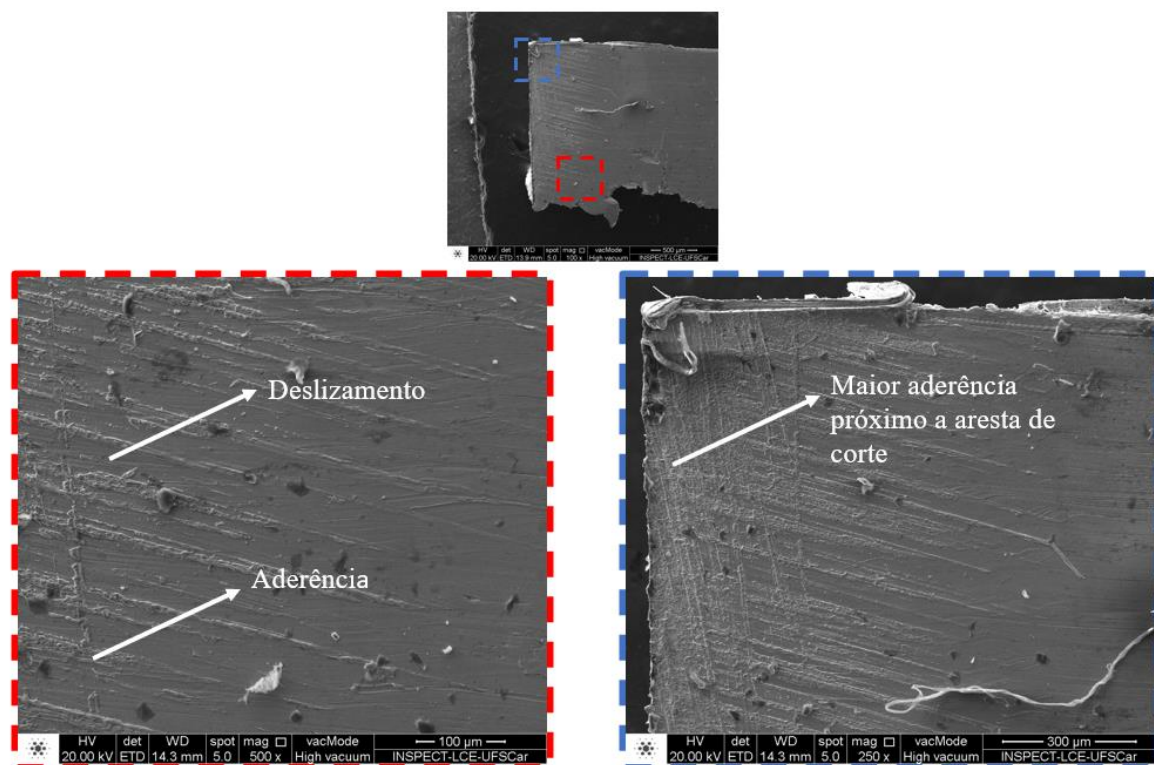


Figura 73: Imagem em MEV do cavaco formado em ferramenta de corte convencional com espessura de corte de 0,10 mm.

Tendo em vista o apresentado na ferramenta de corte sem a presença de microrranhura, o mesmo procedimento foi realizado para a primeira ferramenta de corte texturizada LG0.25. Inicialmente, os cavacos obtidos no corte ortogonal foram registrados no microscópio tipo lupa, como indicado na Figura 74. Tal observação inicial mostrou que, novamente, há indícios da presença das regiões aderência e deslizamento, bem como sua presença em meio a pontos caracterizados pelo corte derivativo. Para as condições que apresentaram microrranhuras sem entupimento da ferramenta LG0.25, é possível observar que o material cortado pela aresta de corte da microrranhura encontra-se aderido na face de contato do cavaco, como representado na Figura 74f e Figura 74h. Nas condições em que o cavaco apresenta forte ligação com cavaco secundário, formado dentro da microrranhura, verificou-se que o cavaco encontrava-se aderido na ferramenta de corte ao final do corte, sendo necessária a remoção manual do cavaco aderido a microrranhura. Esta informação pode ser verificada na Figura 74g, na espessura de corte de 0,35 mm, na qual o cavaco não foi removido do contato.

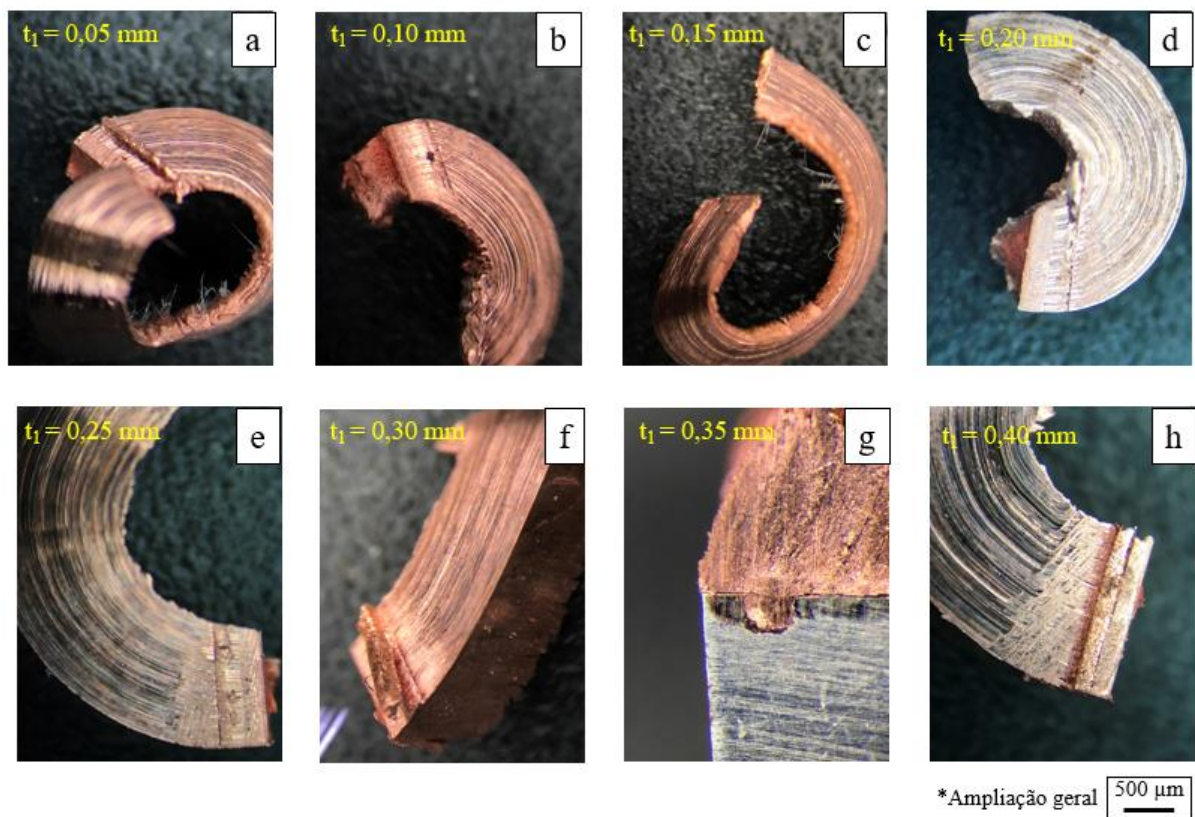


Figura 74: Microscopia da parte inferior do cavaco formado com ferramenta LG0.25 para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40mm.

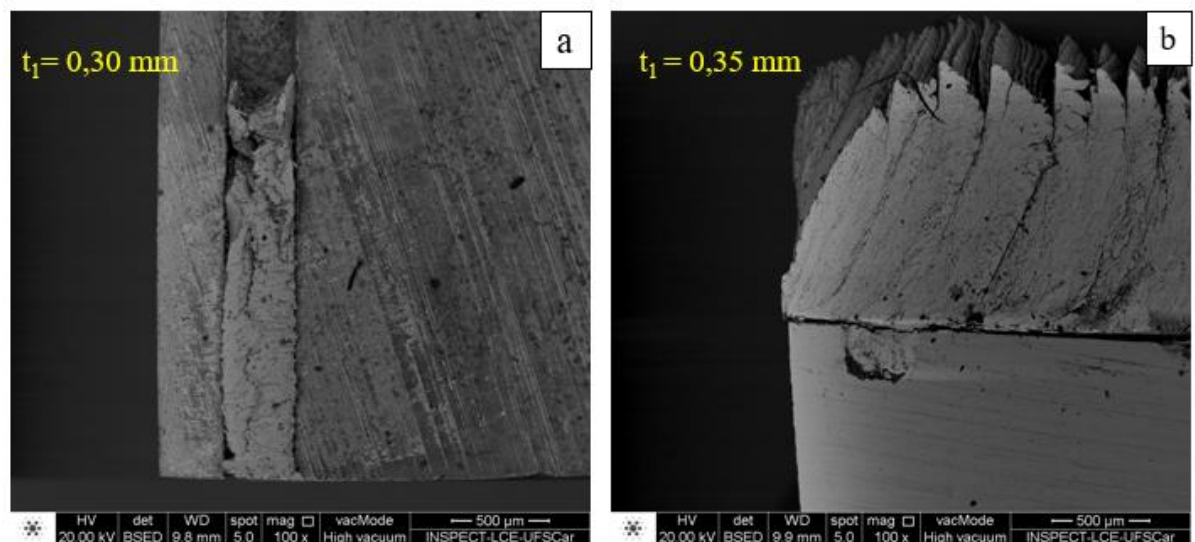


Figura 75: Corte derivativo na (a) ferramenta de corte LG0.25 ($t_1 = 0,30$ mm) com microrranhura preenchida e (b) cavaco aderido na superfície de saída da ferramenta.

Nesta observação, cria-se a hipótese de que a formação do cavaco secundário gerado dentro da microrranhura tem sua componente de força de adesão ampliada pelo grau de entupimento. Para a situação no qual a microrranhura está na região com predominância de aderência, o corte derivativo inicia a formação do cavaco secundário dentro da microrranhura. O progressivo preenchimento pode chegar a um certo limite de entupimento máximo, e, devido a condição compressiva na superfície de saída, a força de reação gerada pelas paredes da microrranhura impede que cavaco secundário tenha forte adesão ao cavaco escoando sob a superfície de saída, gerando uma ancoragem do cavaco secundário dentro da microrranhura, como visto Figura 75a. Essa ancoragem do cavaco secundário na microrranhura faz alusão ao mecanismo de aresta postiça de corte, uma vez que a máxima compressão resultante do total preenchimento da microrranhura gerou uma aderência do cavaco secundário na aresta e nas paredes da microrranhura, e que, ciclicamente, pode soltar-se e formar-se novamente. De forma análoga, o preenchimento ainda parcial da microrranhura, seja por função do tempo ou espessura de corte faz com que ancoragem do cavaco secundário ao cavaco que escoou sobre a ferramenta de corte seja maior, permitindo que este material ainda integre o cavaco principal, como na Figura 75b.

Isto posto, a presente hipótese pode ser reforçada através da observação destes cavacos em MEV. As referidas imagens para esta condição estão apresentadas na Figura 76, exceto para a condição de 0,15 mm e 0,35 mm. É possível observar que ainda existem impressões do acabamento superficial da ferramenta de corte, reforçando que os mecanismos de adesão e deslizamento ainda são válidos para ferramentas de corte texturizadas. Os extremos observados, com profundidades de corte de 0,05 e 0,40 mm, respectivamente na Figura 76a e Figura 76f, mostram claramente que, mesmo com a presença do fenômeno do corte derivativo, pode haver condições distintas após a formação dele.

A espessura de corte de 0,05 mm (Figura 76a) foi eficaz na redução da área de contato. Analisando o limite inicial e final das arestas da microrranhura, é nítido que o cavaco secundário não preencheu totalmente a microrranhura e que não gerou após sua formação uma região característica com marcas de aderência. Nesse ponto, essa “região livre de contato” faz conotação a uma ferramenta de contato restrito. Oposto a isso, a Figura 76f mostra um cavaco secundário de maior volume preenchendo os limites iniciais e finais da microrranhura. Nesta condição, é verificado que após a interação do cavaco com a aresta final da microrranhura, o fenômeno do corte derivativo gerou uma nova região de aderência, justificando que o comprimento de contato total, como indicado na seção anterior, fosse maior que o

comprimento de contato natural da ferramenta convencional. Reafirmando o apresentado anteriormente, caso o corte derivativo não tivesse relação com a nova região de aderência, seria coerente que o comprimento de contato fosse igual ao da ferramenta sem textura.

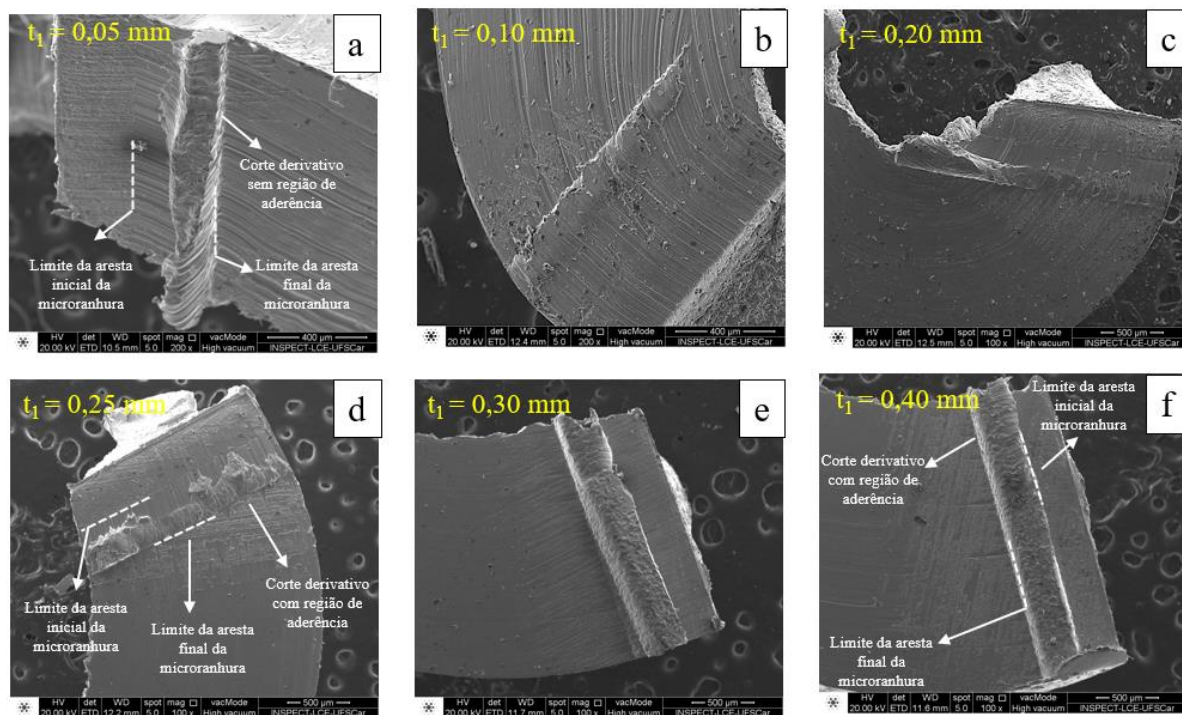


Figura 76: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,20 mm; (d) 0,25 mm; (e) 0,30 mm; e (f) 0,40 mm.

Alterando a posição da microrranhura para 0,5 mm da aresta de corte, com o uso da ferramenta de corte LG0.50, verificamos situações semelhantes ao apresentado na ferramenta LG0.25. Na Figura 77 estão representadas as micrografias da parte inferior do cavaco para a ferramenta LG0.50 e na Figura 78 as imagens realizadas por MEV. É de se observar que o afastamento da microrranhura para 0,5 mm da aresta de corte ainda permitiu que ocorresse o corte derivativo, exceto para a espessura de corte de 0,05 mm, a qual já estava praticamente no seu comprimento de contato máximo. Além disso, a verificação das regiões características como aderência podem ser observadas em situações antes e depois do corte derivativo.

Com maiores detalhes, as imagens da Figura 78 permitem verificar a tendência para formação do cavaco secundário através do corte derivativo da borda da microrranhura. Por exemplo, a Figura 78c, Figura 78d e Figura 78g mostram situações nas quais o cavaco secundário não ficou aderido ao corpo principal do cavaco. Percebe-se que há uma certa

distância entre a região do corte derivativo e a largura total da microrranhura, tendo em vista que é notável uma região sem as marcas de contato e sem o acúmulo do cavaco secundário. Isto posto, nesta pequena região, as ferramentas tiveram seu contato restrito com o cavaco.

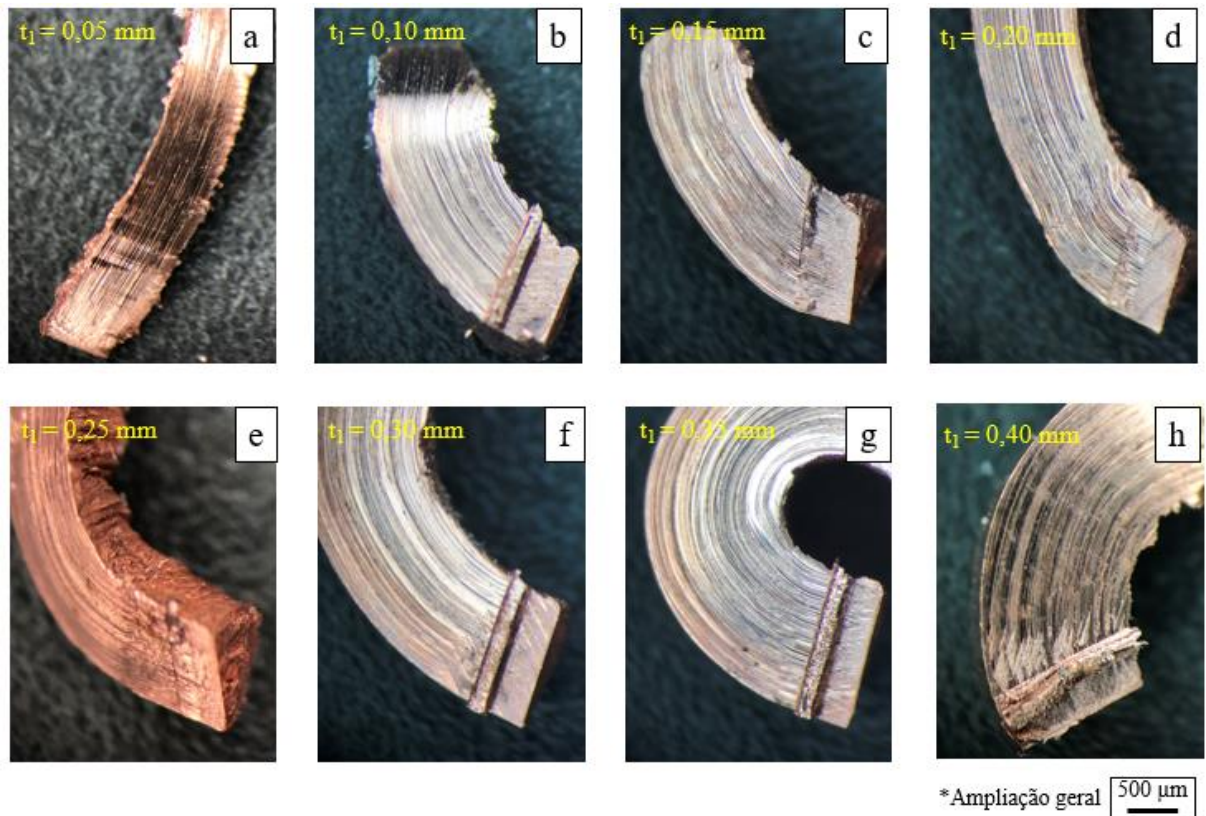


Figura 77: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

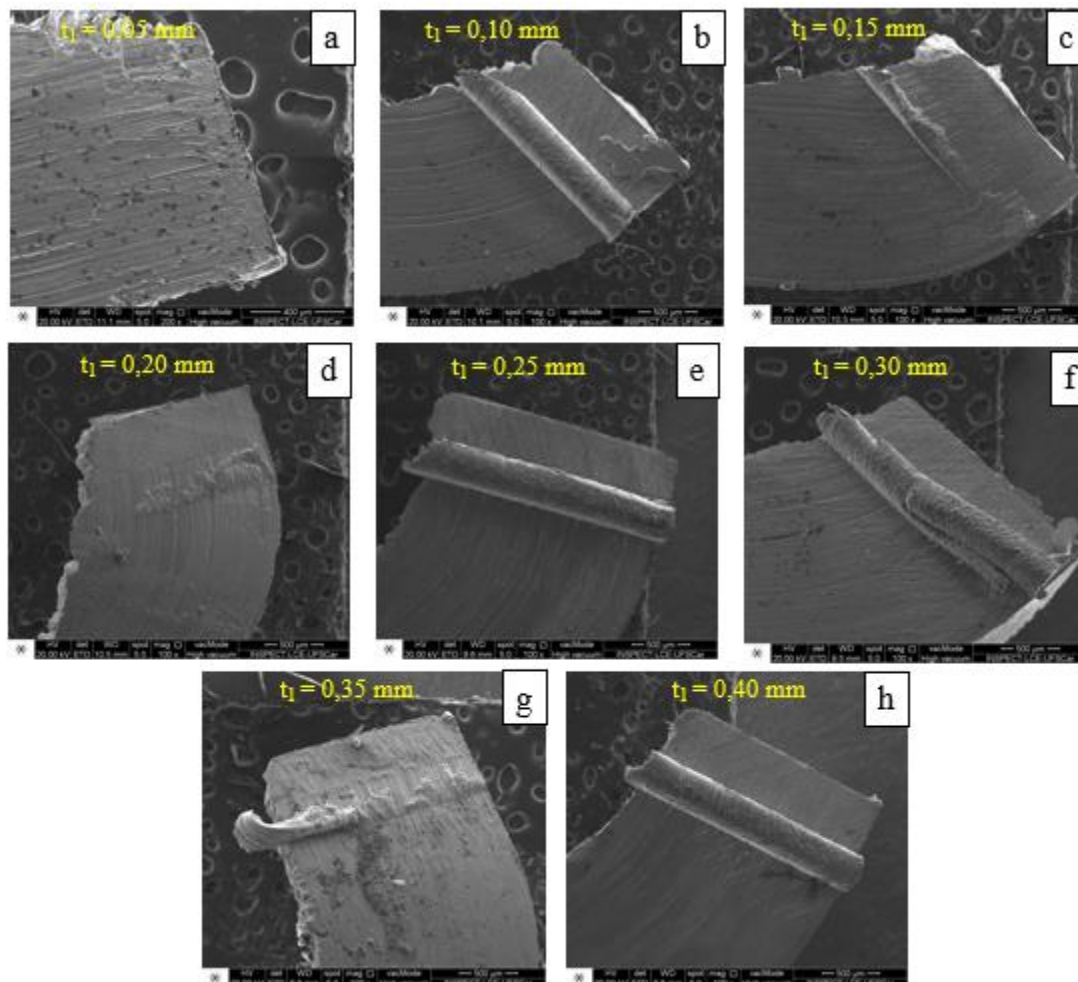


Figura 78: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

Além disso, os comprimentos de contato predominantemente aderentes variaram com o posicionamento da microrranhura. A condição com espessura de corte de 0,10 mm (Figura 78b) apresentou poucas indicações de contato aderente após a presença do cavaco secundário, enquanto para a espessura de corte de 0,15 mm (Figura 78c) já há mais marcas de contato após essa região. Maiores ampliações destas condições são mostradas na Figura 79. Mesmo aparentando ter um cavaco secundário maior, o cavaco mostrado na Figura 79a mostra menor quantidade de aderência se comparado a Figura 79b, analisando a região após o cavaco secundário.

Tais observações corroboram que o aumento de contato pode ocorrer em função de uma microrranhura mal posicionada, como sugere Sugihara et al. (2021) combinado a uma microrranhura com uma aresta aguda, como sugere Duan et al. (2018a).

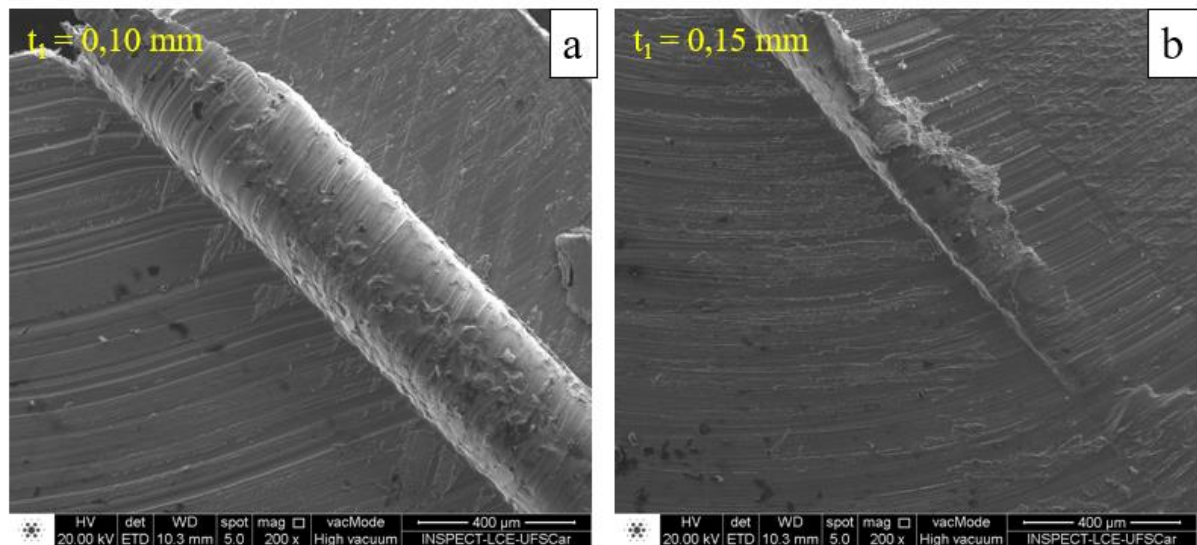


Figura 79: MEV da parte inferior do cavaco formado em ferramenta LG0.50 para as profundidades de corte: (a) 0,10 mm; (b) 0,15 mm.

Posicionando a microrranhura a 0,75 mm da aresta de corte, a ferramenta LG0.75 gerou os cavacos apresentados na Figura 80. Para essa condição também se observam a presença do cavaco secundário gerado pelo corte derivativo. Interessante apontar que, mesmo estando praticamente fora da região de contato, o cavaco da Figura 80b (0,10mm de espessura de corte) apresentou corte derivativo. Apesar de não estar em contato direto com a ferramenta de corte, a grande proximidade do cavaco com a superfície de saída pode, em algum momento, fazer com que o cavaco escoando sobre a superfície de saída viesse a ter contato com a aresta da microrranhura, iniciando o corte derivativo. Efetivamente, os testes com ferramentas de corte pintadas, na busca para evidenciar a área de contato, mostram que o cavaco tende a remover maiores regiões de tinta, o que pode reforçar essa suposição.

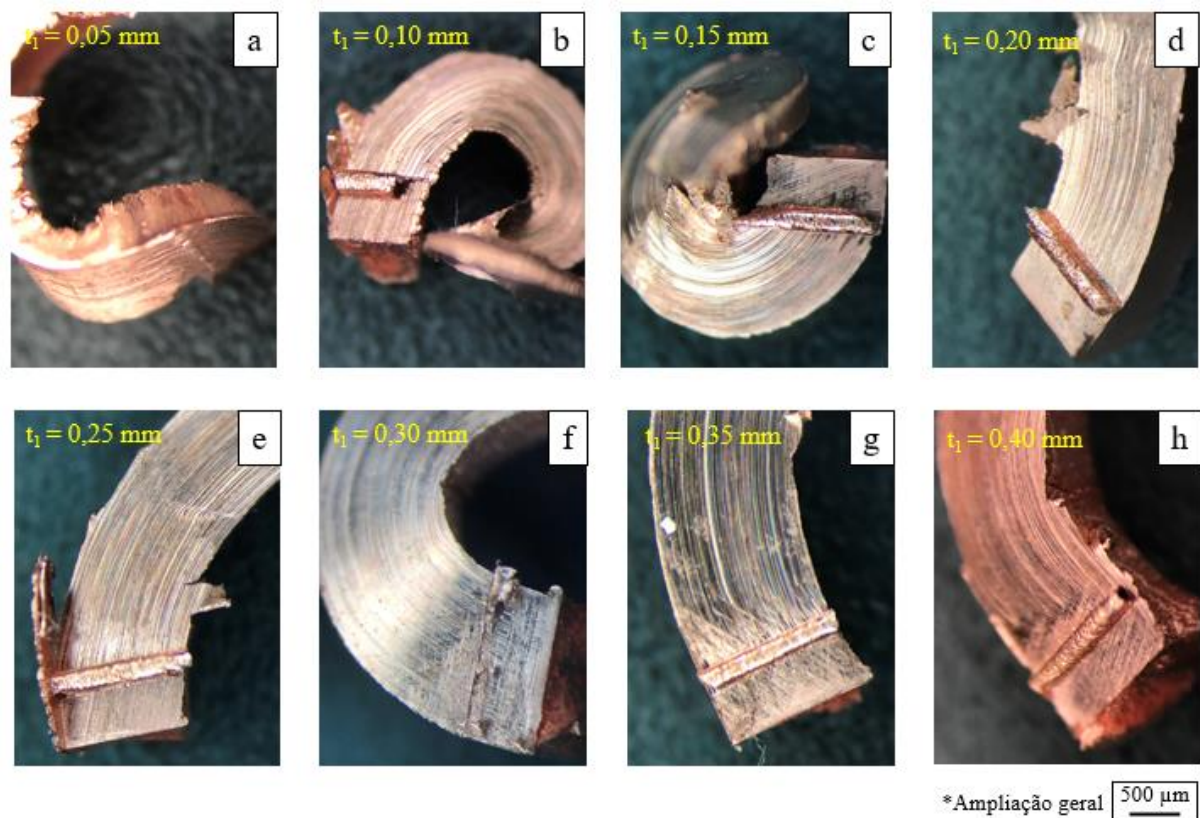


Figura 80: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta LG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

A aplicação das ferramentas LG0.25, LG0.50 e LG0.75 geraram corte derivativo e puderam modificar os comprimentos de contato, gerando novas regiões de aderência e regiões com características de corte restrito. Em vista de comparar a largura das microrranhuras, os cavacos das ferramentas SG0.25, SG0.50 e SG0.75 serão apresentados a seguir.

A ferramenta SG0.75, com microrranhura de 0,15 mm posicionada a 0,25 mm em relação a aresta de corte pode gerar os cavacos apresentados na Figura 81 e Figura 82. As micrografias mostradas na Figura 81 mostram que a presença do cavaco secundário para todas as condições, exceto para a espessura de corte de 0,05 mm (Figura 81a). Mesmo com a menor largura dessa microrranhura, é observável a presença do corte derivativo, indicando que esse fenômeno pode ocorrer em maior ou menor escala, independentemente do tamanho da microrranhura. Este ponto é interessante, tendo em vista que muito trabalhos apontam os melhores resultados em função de ranhuras de menor escala, como citado por Enomoto e Sugihara (2010, 2009). Para a ferramenta de corte SG0.25, não foi observada a ocorrência do

corte derivativo apenas para a espessura de corte de 0,05 mm. Levando em consideração de que os referidos trabalhos aplicam mais do que uma microrranhura, pressupõe-se que o percentual de texturização da área de contato esteja ligado com os resultados obtidos.

As imagens da representam os cavacos da Figura 82, exceto pelas profundidades de corte de 0,05, 0,25 e 0,35 mm. Para as condições representadas através das imagens de MEV, verifica-se que há marcas de aderência após o cavaco secundário, aparentemente em menor intensidade do que as vistas nas ferramentas com microrranhura de 0,35 mm. Todavia, o que é destacado é o massivo preenchimento do cavaco secundário na região da microrranhura. A espessura de corte de 0,10 e 0,15 (Figura 82a e Figura 82b) mostram o cavaco secundário ainda aderido, em tendência de rompimento, enquanto que na Figura 82c à Figura 82e é possível observar as marcas de fratura do cavaco secundário, que, ao serem observadas, indicam que o corte derivativo fez com que a microrranhura ficasse totalmente preenchida. Esse total preenchimento aumentou a ancoragem do cavaco na ferramenta de corte. Além disso, exceto pela espessura de corte de 0,05 mm, a ferramenta SG0.25 não apresentou características de ferramentas de contato restrito.

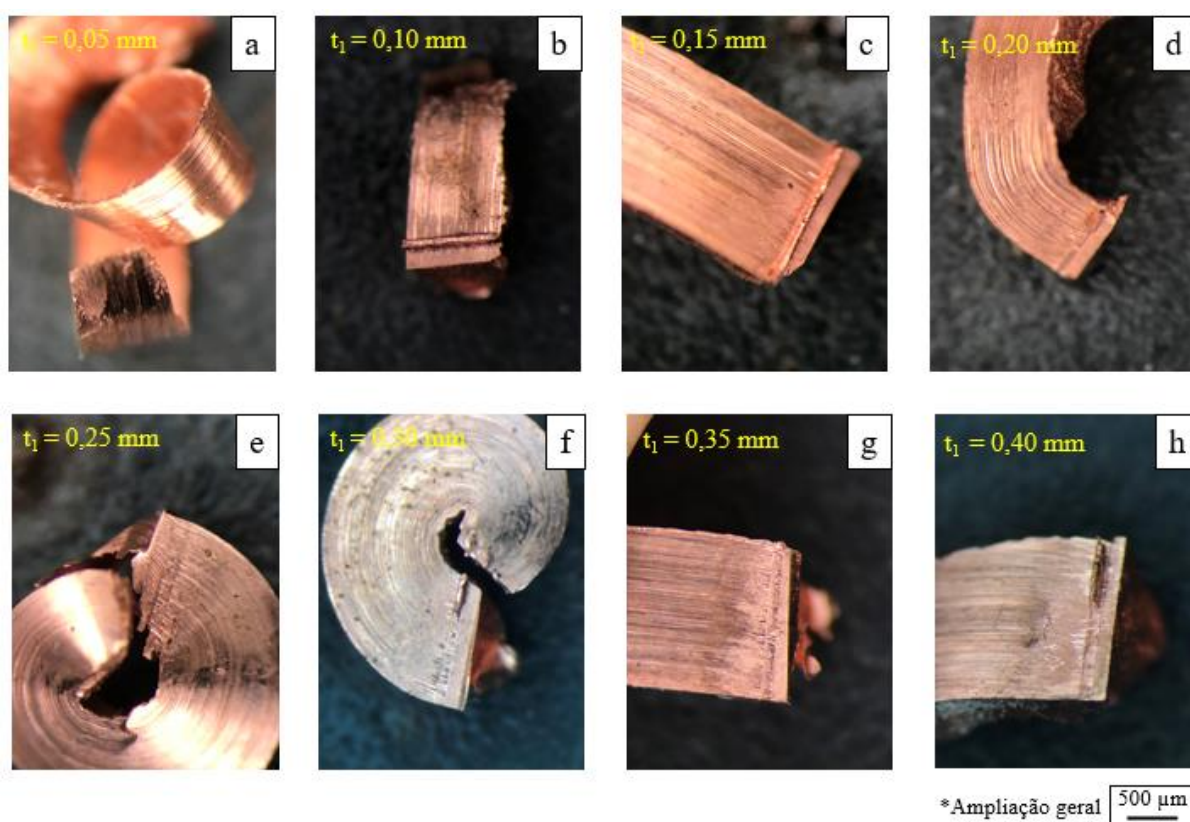


Figura 81: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

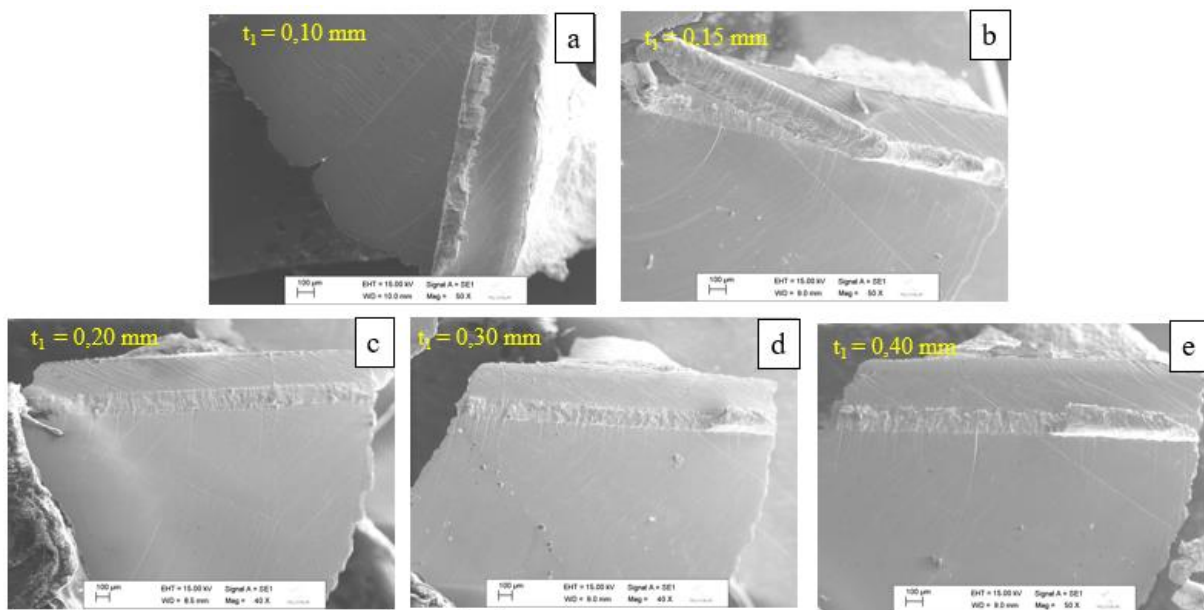


Figura 82: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.25, variando a espessura de corte : a)0,10 mm; b)0,15 mm; c)0,20 mm; d)0,30 mm; e)0,40 mm.

Os cavacos obtidos com a usinagem da ferramenta SG0.50 são apresentados na Figura 83 e Figura 84. Novamente, o afastamento da microrranhura a 0,50 mm não eximiu a presença do fenômeno do corte derivativo. Assim como na ferramenta LG0.50, a ferramenta SG0.50 na espessura de corte de 0,05 mm teria seu microrranhura posicionada no final de sua região de contato, não gerando o corte derivativo. As demais condições, por sua vez mostraram a presença do corte derivativo e a presença mais acentuada das marcas de contato de aderência. As imagens da Figura 84, mostram com mais resolução as regiões de contato, exceto as profundidades de 0,05, 0,25 e 0,35 mm. Através das imagens realizadas por MEV é possível identificar o volume de cavaco secundário, que assim como em SG0.50, preencheu a totalidade ou praticamente todo o volume da microrranhura na interface de contato. Não obstante, as marcas de contato aderente podem ser vistas após a região da microrranhura, o que corrobora com os indícios apresentados sobre a região de contato.

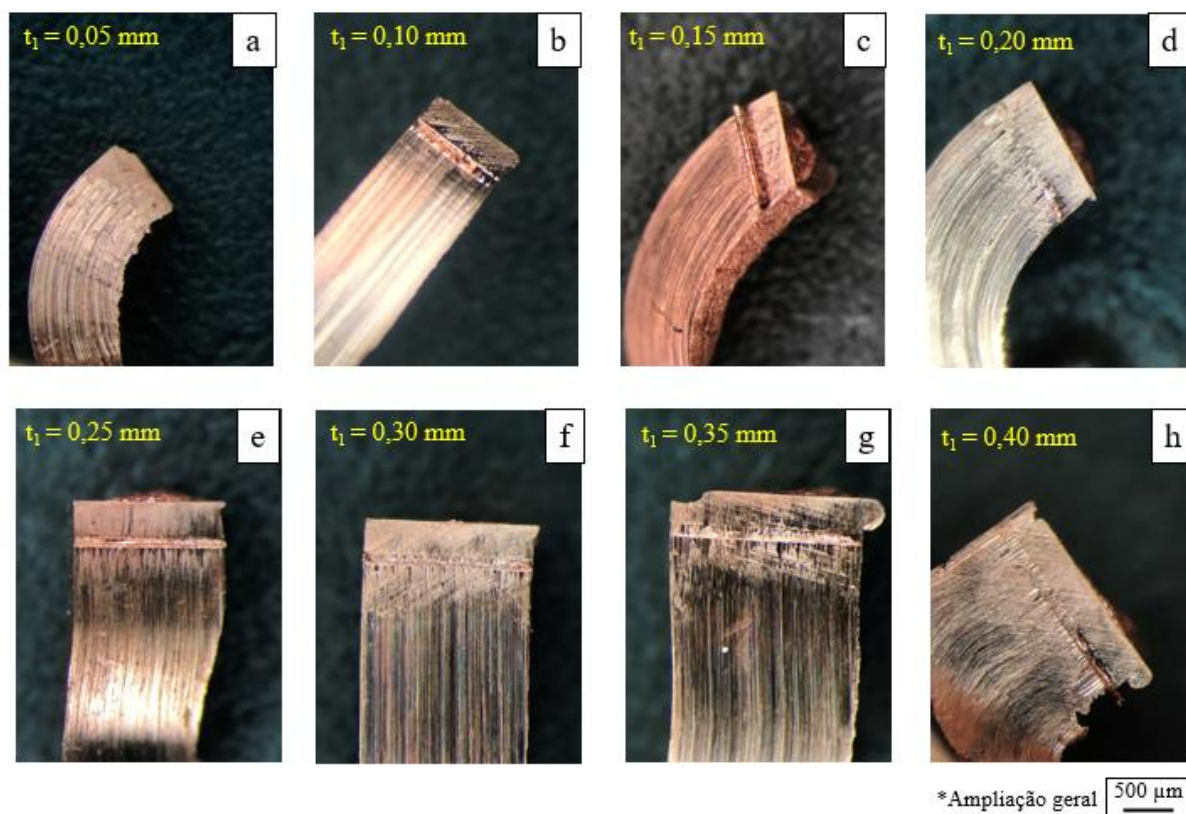


Figura 83: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

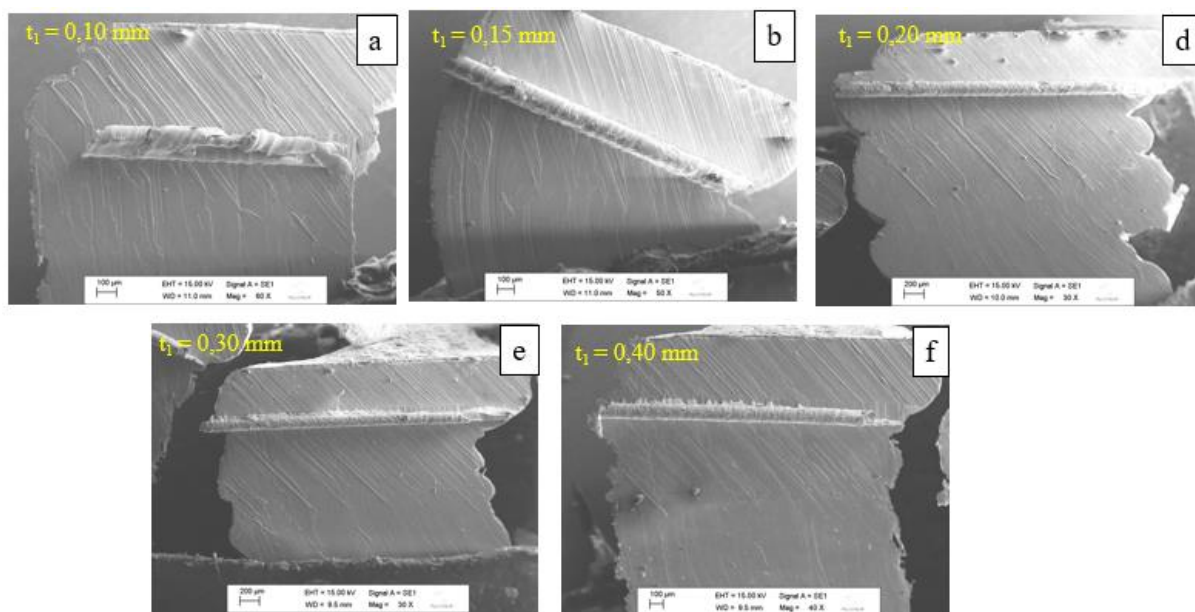


Figura 84: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,10 mm; (b) 0,15 mm; (c) 0,20 mm; (d) 0,30 mm; e (e) 0,40 mm.

Os cavacos obtidos para a ferramenta de corte SG0.75 e registrados com microscópio ótico são mostrados na Figura 85. Novamente, a ranhura posicionada a 0,75 mm da aresta de corte, permitiu a presença do corte derivativo, exceto para a espessura de corte de 0,05 mm (Figura 85a). Isto posto, a dimensão da microrranhura não é o que pode determinar o aparecimento ou não do corte derivativo, e sim seu posicionamento e suas características geométricas, indo de acordo ao apresentado por Duan et al. (2018a). As imagens obtidas por MEV, indicadas na Figura 86 mostram com maior clareza as regiões de contato e a característica do cavaco secundário. De maneira interessante, os cavacos de 0,10 e 0,15 mm de espessura de corte (Figura 86b e Figura 86c) não apresentam marcas de aderência após a presença do cavaco secundário, mas deixaram vestígios de contato na ferramenta de corte.

Outro ponto interessante, é que as marcas de quebra dos cavacos secundários para as profundidades de corte de 0,35 e 40 mm (Figura 86f e Figura 86g) indicam que o cavaco secundário não preencheu totalmente a microrranhura. Todavia, esta pequena região sem contato com a ferramenta de corte pode não ter sido suficiente para reduções expressivas nas forças de corte, como será apresentado em seções futuras.

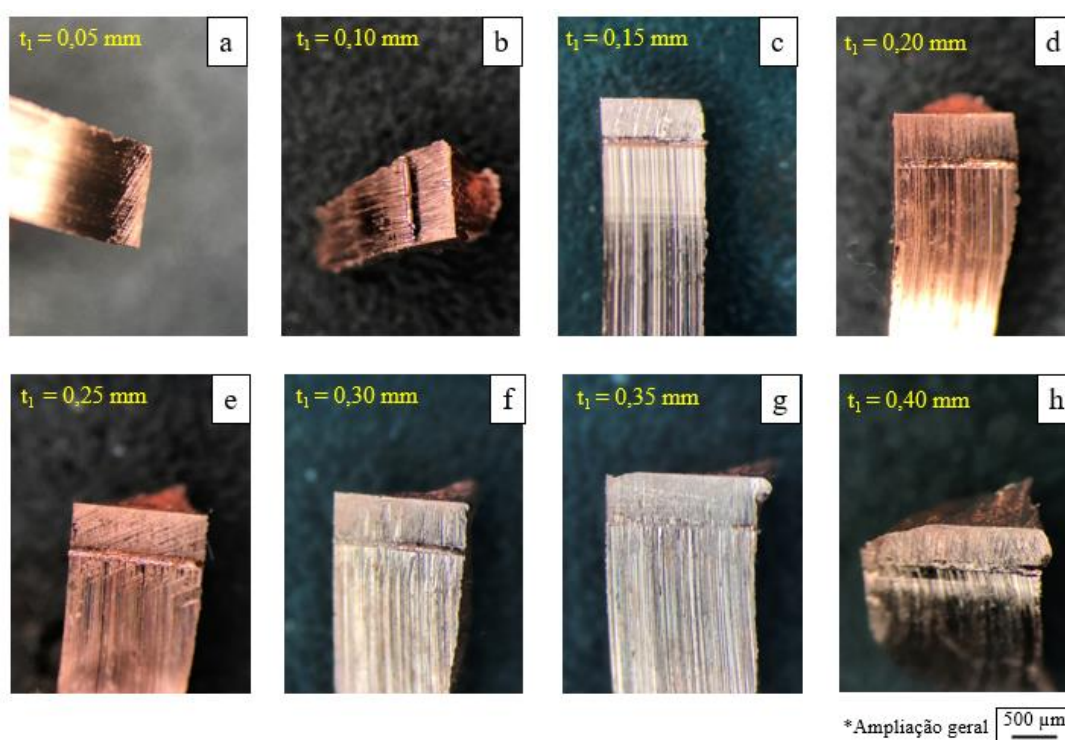


Figura 85: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

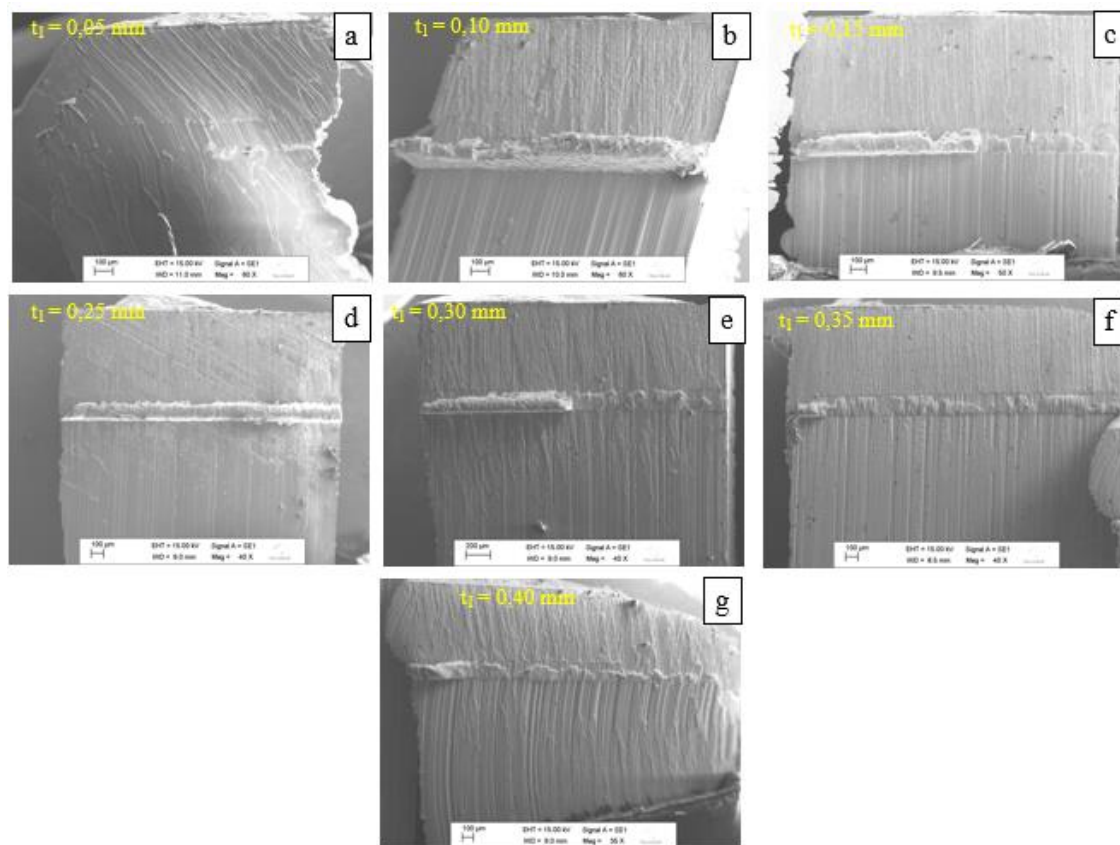


Figura 86: MEV da parte inferior do cavaco para ferramenta SG0.75 para diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,15 mm; (c) 0,20 mm; (d) 0,25 mm; (e) 0,30 mm; (f) 0,35 mm; e (g) 0,40 mm.

Tendo em consideração que a presença das microrranhuras pode em alguns casos gerar uma nova área de aderência em outros casos não, a relação entre cavaco derivativo e aresta da microrranhura pode, em partes, governar este tipo de relação. Inicialmente, considerando apenas os vestígios das marcas na região de contato com a ferramenta de corte, é de se observar que os cavacos que geraram regiões de aderência após o contato com a aresta da microrranhura tiveram a tendência de apresentar uma superfície mais “polida”, ao passo que os cavacos que não geraram condições de aderência após o contato com a microrranhura geraram condições mais rugosas, coincidente com o grau de acabamento da aresta de corte da microrranhura. Uma comparação entre as duas condições pode ser observada na Figura 87, para os quais a condição LG0.25 apresenta uma região de aderência após o contato com a microrranhura, ao passo que a mesma ferramenta em espessura de corte de 0,05 mm apresenta corte derivativo, mas não apresenta indícios de uma região de aderência de grande magnitude.

Duan et al. (2018a) mostram indícios da formação de aresta postiça de corte na borda da microrranhura. Ao longo da usinagem, segundo os autores, a presença das arestas postiças

pode ser observada na face de contato do cavaco com a ferramenta de corte. Todavia, os resultados observados neste experimento não corroboram para a afirmação da presença de resíduos de aresta postiça de corte na região de contato com o cavaco. Entretanto, sugere-se que a que ancoragem mecânica ocorre dentro da microrranhura com a formação do cavaco secundário. Diante da condição de maior preenchimento, o cavaco secundário tem maior força de ligação com as paredes da microrranhura, ao passo que em menores preenchimentos, o cavaco tem maior ligação com o cavaco que escoia sobre a superfície de saída, que o remove durante a usinagem.

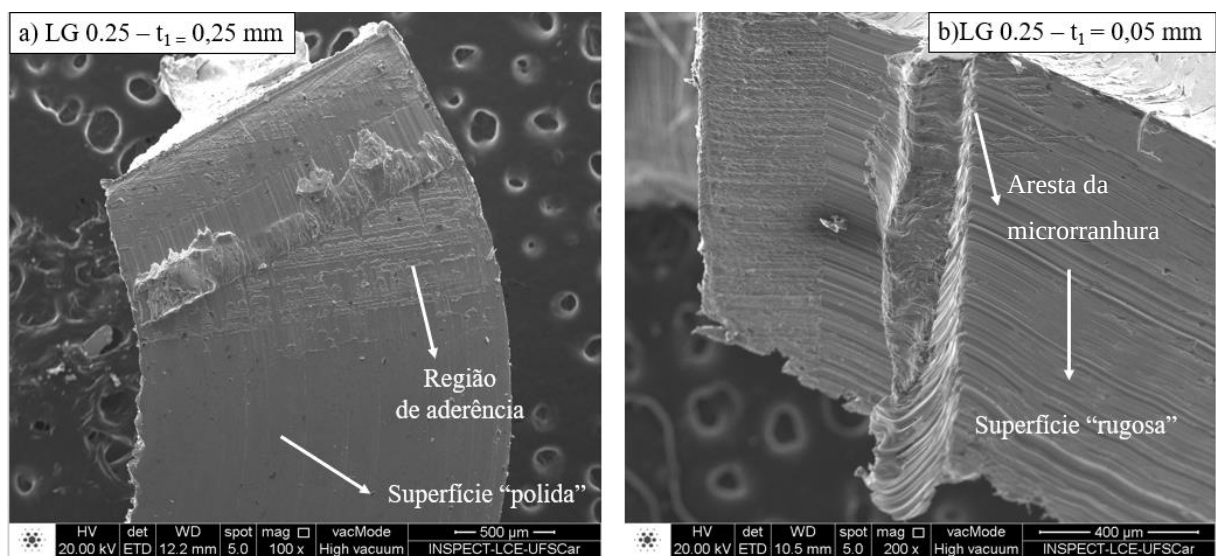


Figura 87: (a) Área de aderência após corte derivativo e (b) sem região de aderência após corte derivativo.

Através das medições realizadas na superfície de saída da ferramenta de corte e por meio das Figuras mostradas na seção anterior, é verificado que as microrranhuras estiveram dentro das regiões de contato entre cavaco e ferramenta de corte. Retornando ao posicionamento das microrranhuras à 0,25 mm da aresta de corte, possível observar que, em termo de comprimento de contato, as microrranhuras menores e maiores apresentaram comportamento semelhante. Em termos de corte derivativo, ambas as situações apresentaram o fenômeno, seja em observações no cavaco ou na ferramenta de corte. Quanto a característica do contato, a ferramenta de corte SG0.25 mostrou uma superfície de contato do cavaco mais polida em ambas as regiões, sugerindo a presença de regiões de aderência mais acentuadas. Tal informação pode ser ainda mais efetiva através do grau de entupimento das microrranhuras, sugerindo que para um grau

de entupimento elevado, a microrranhura perde sua função, como indicado por Sugihara et al. (2021) e Duan et al (2017, 2018a). Neste ponto, ao perder sua função, a microrranhura entupida “reestabelece” a superfície de saída e permite o polimento da superfície do cavaco através da região de aderência seguida pelo deslizamento.

Afastando-se a microrranhura a 0,50 mm da aresta de corte, é notório que o comprimento de contato obtido com as microrranhuras menores destoa dos comprimentos de contato dos canais maiores. Neste ponto, observam-se a presença de zonas de aderência em ambas as ferramentas de corte, todavia, as microrranhuras maiores tendem a manter a redução do comprimento de contato, permitindo espaços em vazio dentro das microrranhuras por mais tempo.

Com a presença das microrranhuras a 0,75 mm da aresta de corte, ambas microrranhuras continuam a apresentar a característica do corte derivativo, tendo sido observadas as imagens dos cavacos. Todavia, neste posicionamento, as microrranhuras passam a ser ineficientes quanto a redução de esforços, como será mostrado futuramente. Regiões de aderência ainda são observadas nos cavacos, mostrando que, mesmo na posição mais distante da aresta de corte, a região de aderência ainda é presente, como visto nas imagens da superfície de saída da ferramenta de corte.

Por fim, aponta-se que mesmo o afastamento da microrranhura em relação a aresta de corte ainda permite a formação de corte derivativo, para os quais apenas a observação da superfície de saída da ferramenta de corte pode não ser o suficiente para a correta determinação da ocorrência do corte derivativo. Kishawy et al. (2022), determinam a eficácia do posicionamento das microrranhuras baseados em uma otimização numérica e determinam que, ao posicionar as microrranhuras a 160 μm , com um avanço de 0,09 mm/volta, não observaram corte derivativo. De fato, a relação l_1/t_1 atinge um valor de 1,77, tendendo a região 2 de Sugihara et al. (2021), com reduções de esforços. No entanto, o corte derivativo pode ter ficado aderido ao cavaco ao final do corte, e não ter entupido a microrranhura.

4.2.2 Corte ortogonal com ferramentas de contato restrito

Os cavacos obtidos durante a aplicação de ferramentas de corte texturizadas, contendo uma microrranhura, apresentaram características interessantes, principalmente quanto a formação de um cavaco secundário devido ao fenômeno do corte derivativo, culminando em alterações nos perfis de comprimento de contato aderência e deslizamento. Tendo vista que o

correto posicionamento das microrranhuras é influenciado pela posição relativa à aresta de corte e que, comprovadamente a área de contato faz total relação com as condições de usinagem, o comparativo entre os cavacos gerados com as ferramentas de corte com uma microrranhura e os gerados por ferramentas de contato restrito podem elucidar algumas questões relativas à redução da área de contato.

Os cavacos obtidos para a ferramenta de corte RC0.25 estão representados na Figura 88. Notavelmente, os cavacos mostraram-se muito longos, característica essa não apresentada nos cavacos com ferramentas de corte texturizadas. Como apresentado na seção que tratou sobre área de contato, a ferramenta RC0.25 atingiu as menores relações t_1/l , variando de 0,2 até 1,6. Para tal ferramenta, a redução da área de contato ocorreu desde a espessura de corte de 0,05 mm, considerando que a ferramenta convencional a essa espessura de corte já apresentou comprimento de contato aproximado de 0,55 mm. Por fim, apresenta-se que para a ferramenta de contato restrito RC0.25, todas as marcas observadas são restritamente relativas às regiões predominantes de aderência.

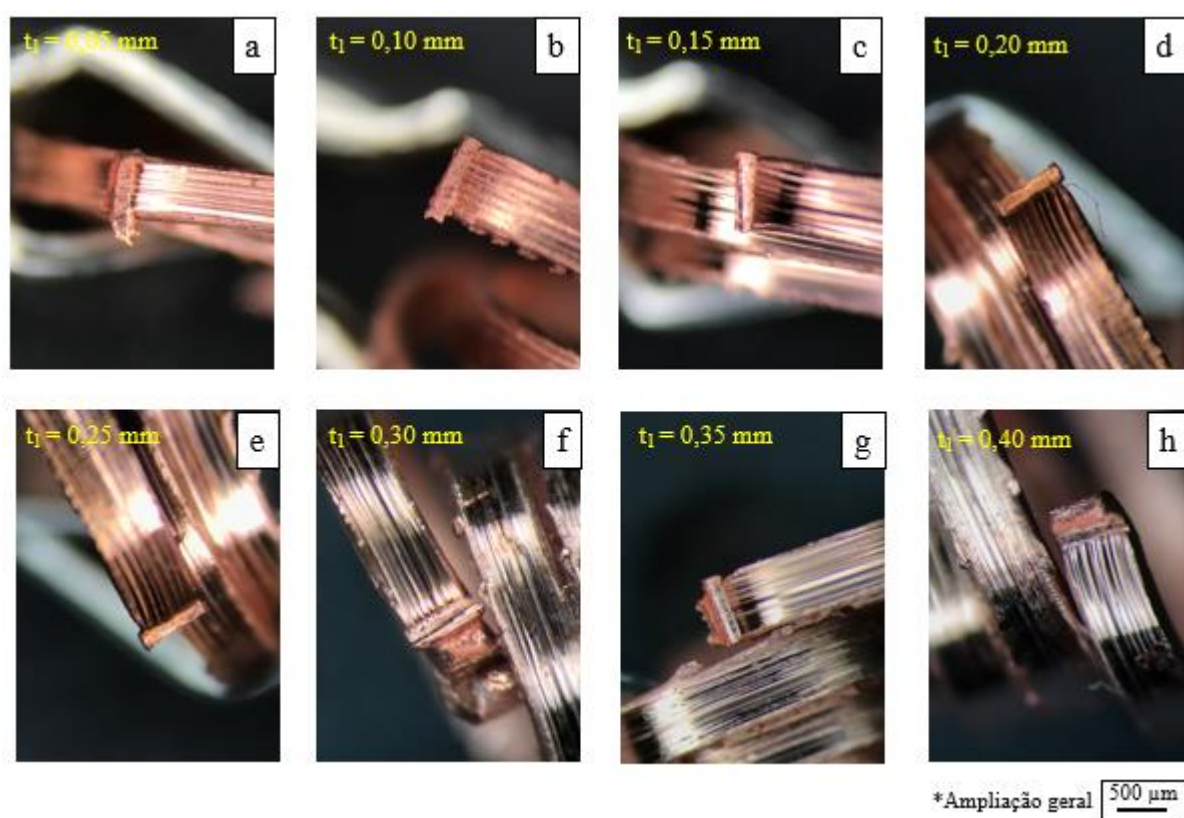


Figura 88: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC0.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

Aumentando-se o comprimento restrito de contato para 0,50 mm em relação a aresta de corte, temos os cavacos obtidos durante o corte ortogonal com a ferramenta de corte RC0.50 apresentados na Figura 89. Essa ferramenta, assim como a ferramenta RC0.25, restringiu o contato de todas as condições de usinagem, ficando apenas próxima do contato real para a espessura de corte de 0,05 mm, representado no cavaco da Figura 89a. Ainda, como já apresentado, a ferramenta RC0.50 atingiu valores de t_1/l de 0,09 até 0,8 a partir da espessura de corte de 0,3 mm, representado na Figura 89f. Apesar disso, todos os cavacos apresentaram regiões de contato características de aderência, mas menos longos se comparados aos cavacos da ferramenta RC0.25.

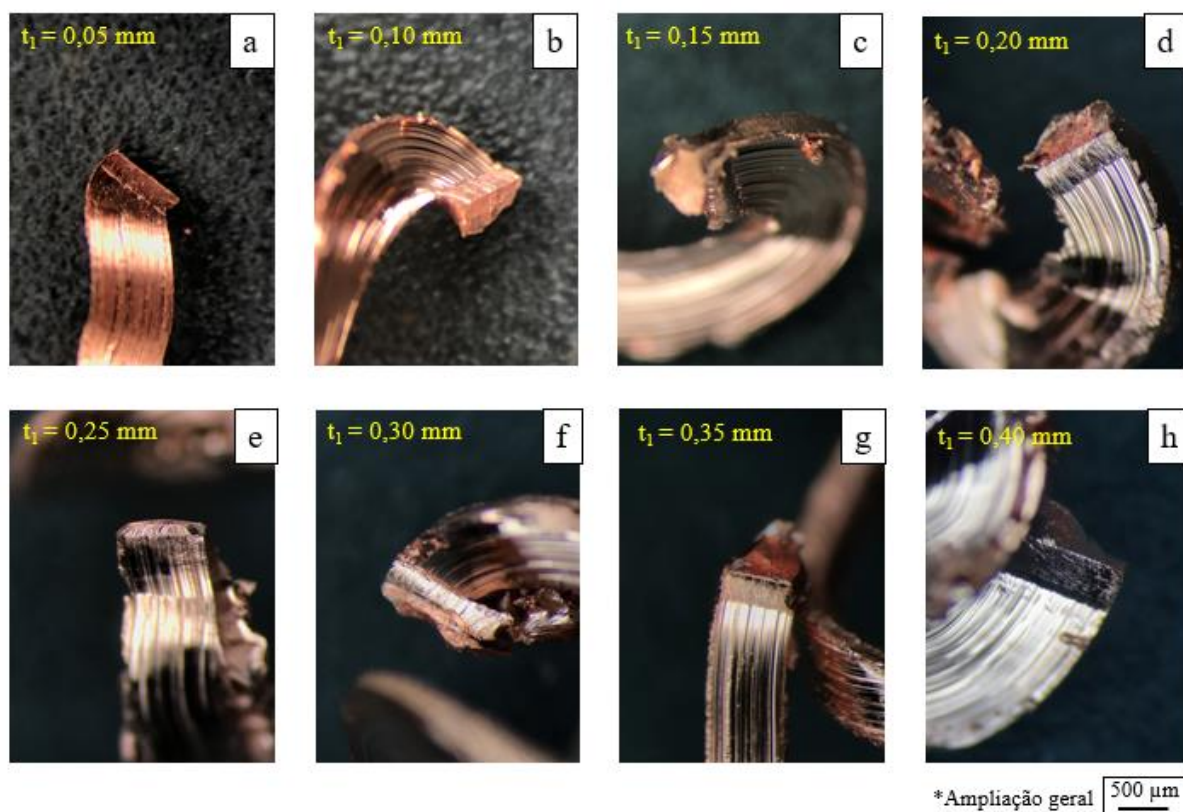


Figura 89: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC0.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

Estão representados na Figura 90 os cavacos obtidos durante o corte ortogonal com a ferramenta RC0.75. Com esta ferramenta, os comprimentos de contato naturais foram atingidos com as profundidades de corte de 0,05 e 0,10 mm, representadas na Figura 90a e Figura 90b, sendo possível verificar as marcas de contato em todas as profundidades de corte. Com esta ferramenta, foram obtidos valores de t_1/l de 0,09 até 0,53. Assim como citado, a tendência do

aumento da largura do cavaco é vista com mais clareza a partir da ferramenta RC0.75 em diante. Em sequência, os cavacos das ferramentas de corte RC1.00, RC1.25 e RC1.50 são mostrados na Figura 91, Figura 92 e Figura 93, para os quais os comprimentos de contato chegam pontualmente aos comprimentos reais. Por fim, os cavacos apresentados Figura 93 foram obtidos com uma ferramenta de contato restrito que permitiu o comportamento igual ao da ferramenta convencional, um uma região de contato disponível de 1,5 mm.

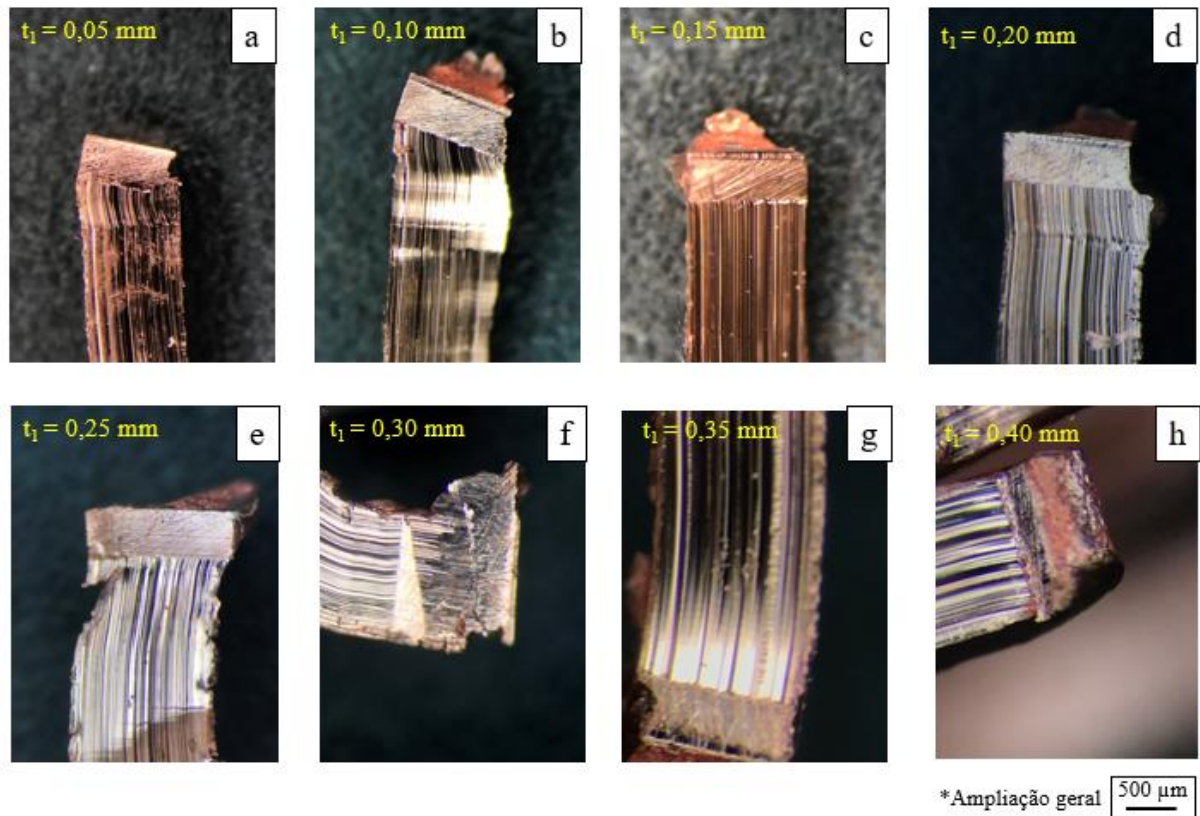


Figura 90: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC0.75 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

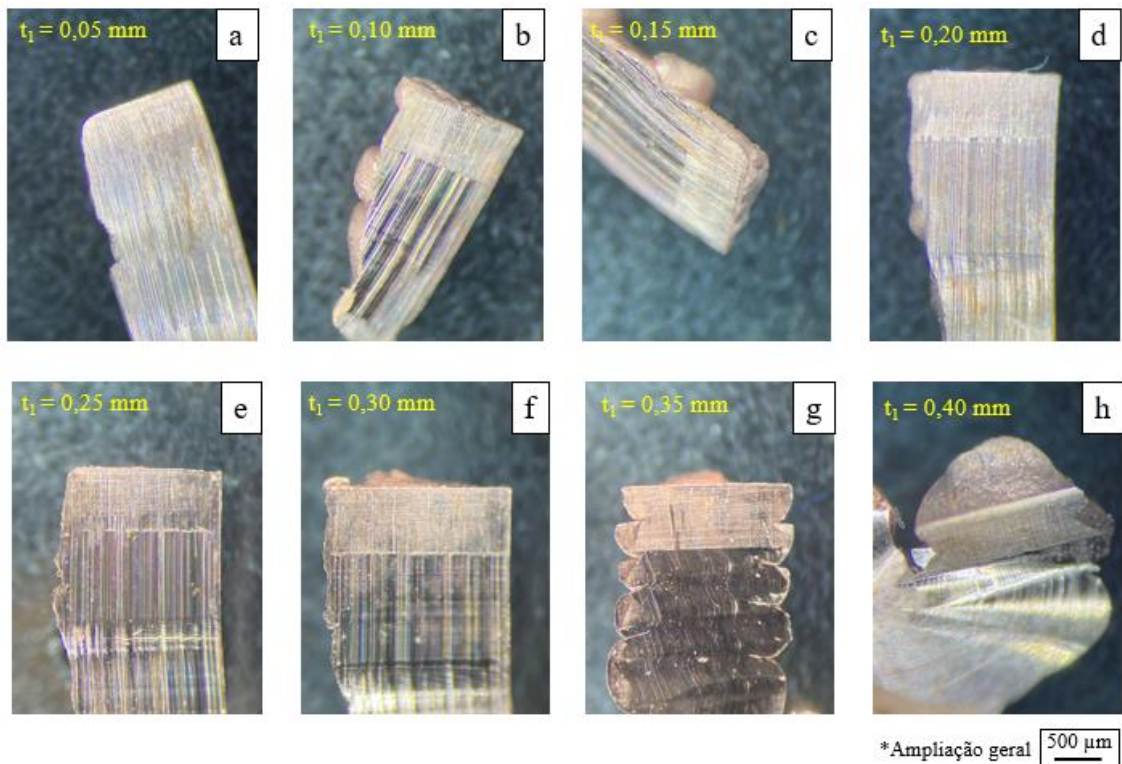


Figura 91: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC1.00 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

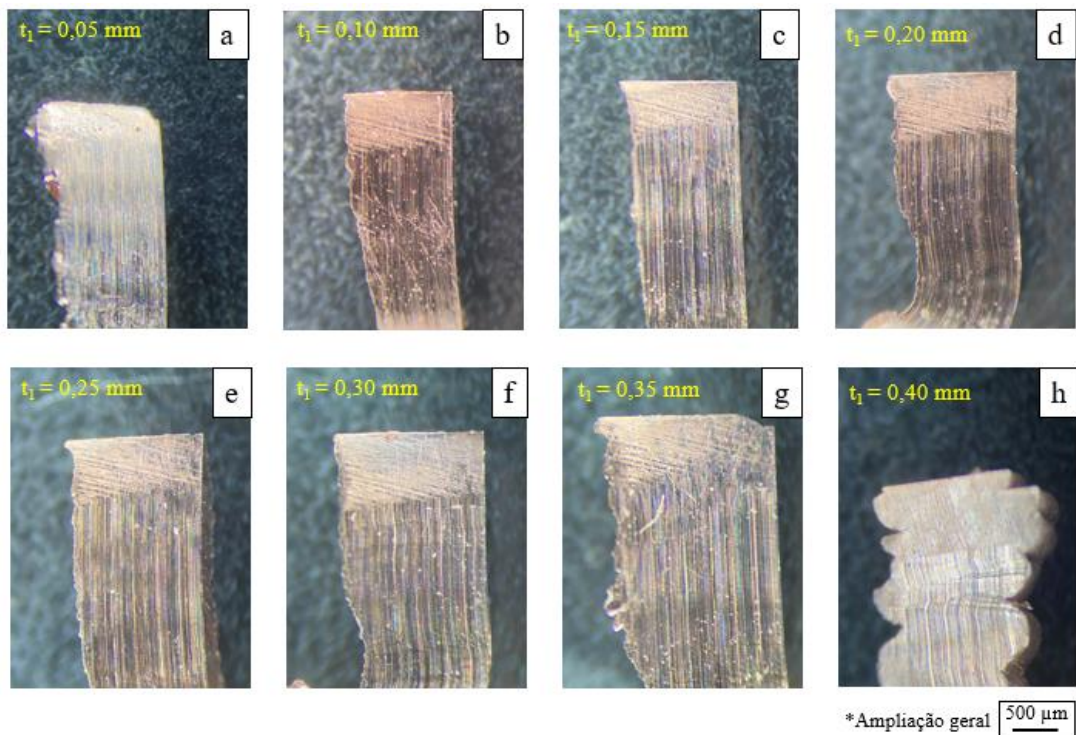


Figura 92: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC1.25 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

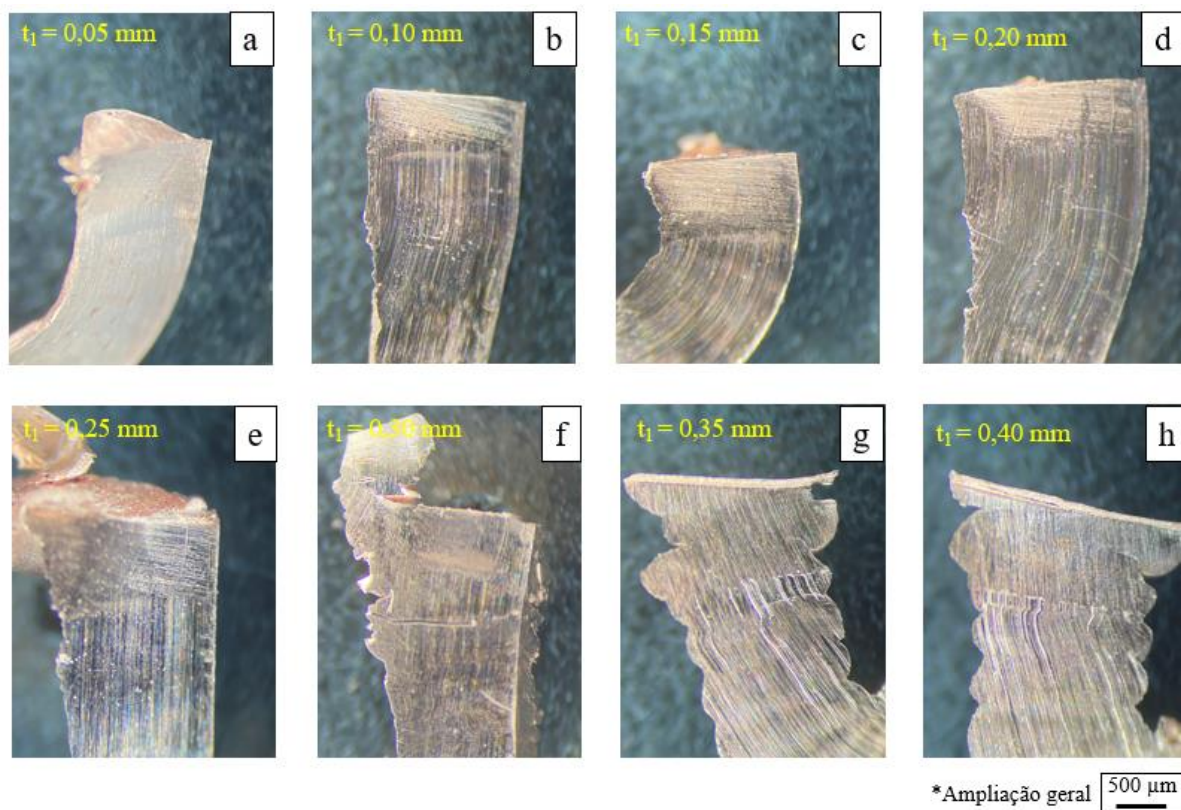


Figura 93: Microscopia da parte inferior do cavaco para ferramenta de contato restrito RC1.50 em diferentes profundidades de corte: (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

É interessante se notar que os cavacos obtidos com as ferramentas de corte com contato restrito, mesmo em condições de já atingirem o contato real, mostram em muitos casos, uma linha bem definida ao final da região de contato, indicando o ponto final de contato com a ferramenta de corte. Isso deve-se a tendência de curvatura do cavaco em função do avanço da ferramenta de corte, como mostrado por Lo et al. (1966) na revisão da literatura e como será apresentado durante a avaliação da filmagem do corte ortogonal.

A Figura 94 apresenta a espessura de corte de 0,10 mm com o progressivo aumento do comprimento de contato, variando de 0,25 mm com a ferramenta RC0.25 até o comprimento de 1,50 mm com a ferramenta RC1.50. A marca visualizada do final da região de contato restrito vai se suavizando ao passo que o comprimento de contato é aumentado, tendo em vista que em 1,25 mm de comprimento de contato permissível o cavaco já apresenta as regiões de deslizamento reestabelecidas, apresentando maior polimento da superfície do cavaco.

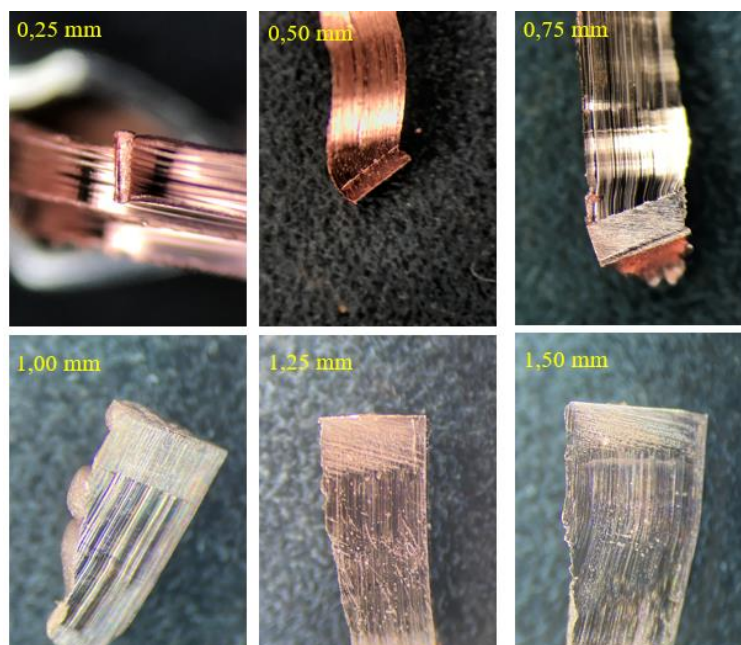


Figura 94: Superfície inferior dos cavacos obtidos com a espessura de corte de 0,10 mm e aumento progressivo da superfície de contato restrito de 0,25 até 1,5 mm.

4.3 OBSERVAÇÕES DIRETAS NA FORMAÇÃO DO CAVACO

Nas seções anteriores, a relação entre região de contato e o posicionamento e largura da microrranhura foram avaliadas, indicando que o comprimento de contato pode ser ampliado, ao invés de reduzido, tendo em vista a presença do corte derivativo. De fato, como também já mostrado, o corte derivativo pode alterar as condições de contato entre cavaco e ferramenta, gerando novas regiões de aderência. Tendo isso em vista, a presente seção mostra observações diretas realizadas por filmagem durante o corte ortogonal para ferramentas de contato restrito e ferramentas contendo uma microrranhura. Além disso, micrografias realizadas em amostras obtidas por QSD são apresentadas, juntamente a dados como grau de recalque.

4.3.1 Observações diretas na formação do cavaco com ferramentas de corte restrito

A realização do corte ortogonal pode mostrar a interação entre o cavaco e ferramenta em uma vista lateral, permitindo observar as relações entre a formação de cavaco e as modificações nas ferramentas de corte. As profundidades de corte, variando de 0,05 a 0,40 mm, em intervalos de 0,05 mm geraram curvas de grau de recalque que serão tratadas a seguir. A ferramenta sem texturização, representada na Figura 95, mostra as oito profundidades de corte

no instante de 5 segundos de corte. As demais Figuras que mostram o corte ortogonal nesta seção também se aplicam a este tempo de usinagem, exceto as que forem mencionadas em intervalos de tempo distintos.

O progressivo aumento da espessura de corte gerou diminuição no grau de recalque para a condição convencional, mostrando uma curva típica indicada na Figura 96. Recorda-se que a espessura de corte limite foi de 0,4 mm, devido a condições de setup aplicados.

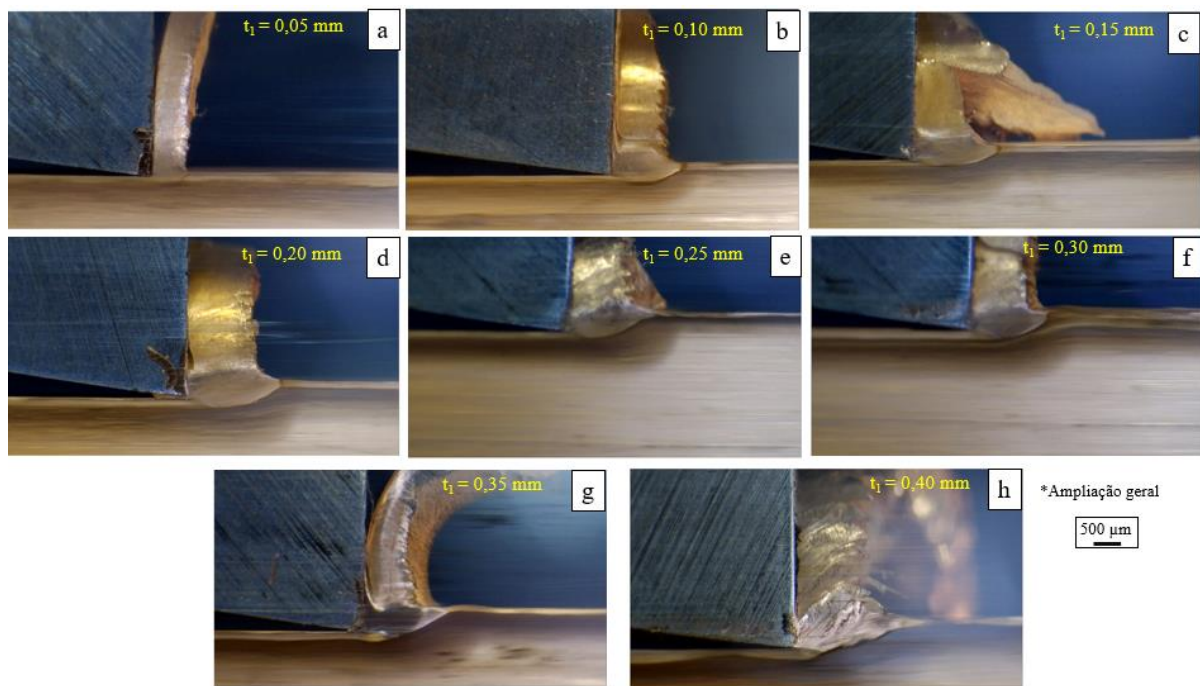


Figura 95: Corte ortogonal com a ferramenta convencional em função da espessura de corte de (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

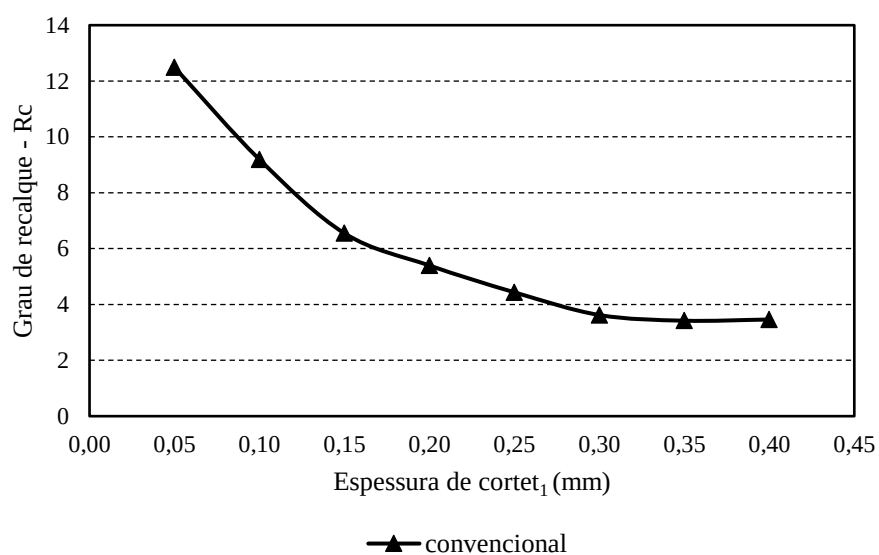


Figura 96: Grau de recalque obtido com ferramenta de corte convencional.

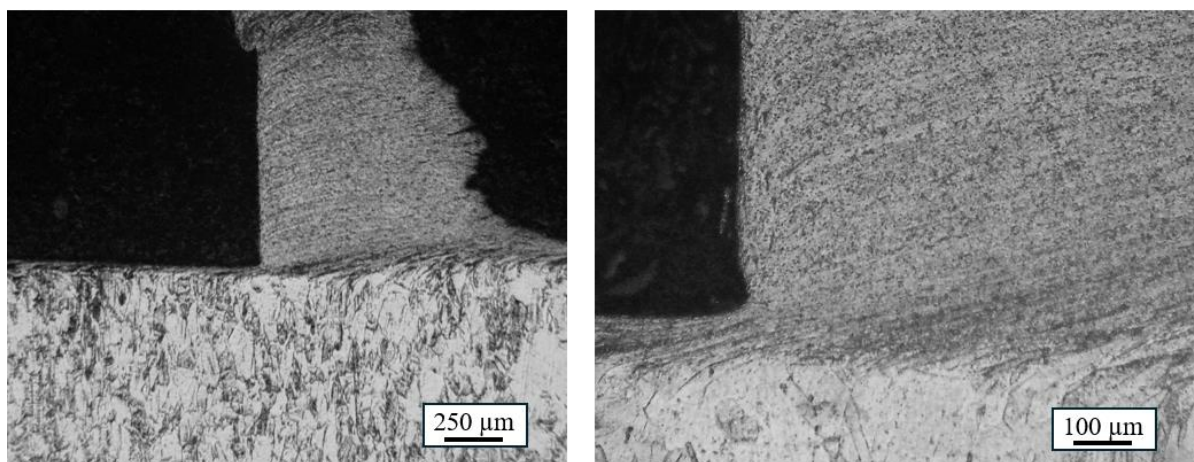


Figura 97: Imagem em QSD para a condição convencional (0,2 mm/rev).

Uma imagem da seção transversal do cavaco, obtida com QSD é mostrada na Figura 97. O aumento na espessura do cavaco é devido à dificuldade do escoamento do cavaco na superfície de saída, encruando o cavaco. Tal encruamento é observado na Figura 97, até mesmo dificultando a observação das linhas de fluxo do cavaco. Se por um lado, o cobre permitiu a observação coerente do fenômeno do corte derivativo, por outro lado gerou um cavaco altamente encruado.

As ferramentas de contato restrito atuaram diretamente na alteração do grau de recalque devido a restrição do comprimento de contato, como indicado na Figura 98. Não obstante, a relação t_1/l , pode ser aplicada para apresentar os graus de recalque, como mostrado na Figura 99, indicando a tendência de diminuição do grau de recalque em função do aumento de t_1/l . Em vistas ao fato de que as ferramentas com maior restrição de contato geraram menores relações t_1/l , os valores decrescentes do grau de recalque concentram-se mais à esquerda do gráfico. Levando em consideração o parâmetro de espessura de corte, os dados apresentados na Figura 98 têm características semelhantes a apresentadas por Jawahir (1988) e De Chiffre (1982), mostradas nas curvas 5 e 3 da Figura 8. Mantidas as profundidades de corte para todas as ferramentas de corte aplicadas, os valores de t_1/l atingem maiores valores em função do aumento do comprimento de contato disponível.

Retornando a Figura 98, a ferramenta que proporcionou menor área de contato, restringindo o corte a um comprimento de contato de 0,25 mm, representada pela ferramenta RC0.25, obteve os menores valores relativos a grau de recalque, com reduções de 49 a 59 % em relação a ferramenta de corte convencional. Com esta ferramenta, a partir da espessura de corte de 0,20 mm, houve uma tendência de estabilização da curva, e a partir de 0,3 mm o grau de recalque se estabilizou em torno de um valor de 1,7. As imagens apresentadas na Figura 100, mostram a captura de imagem durante a formação do cavaco para a ferramenta de corte RC0.25, para os quais nitidamente verifica-se o maior comprimento do cavaco, ocorrido pela limitação do comprimento de contato entre cavaco e ferramenta.

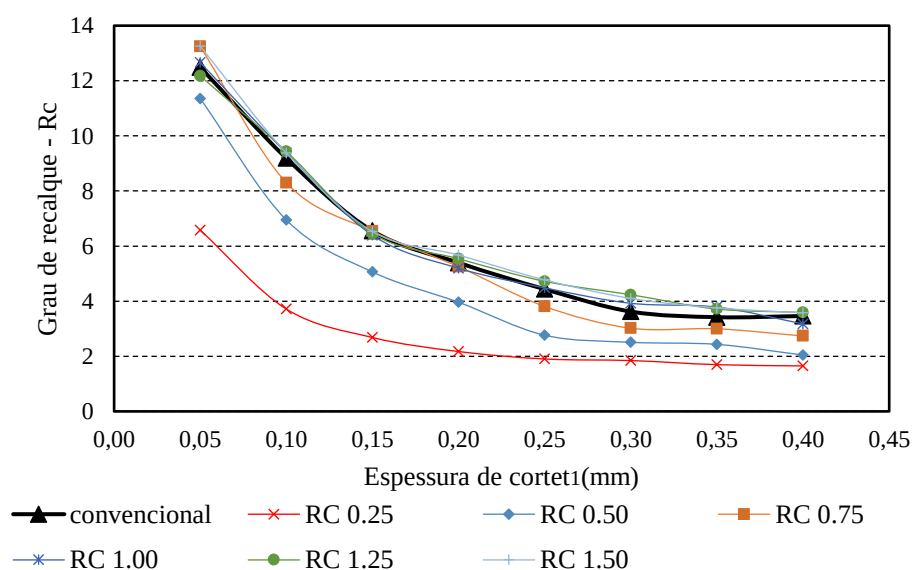


Figura 98: Grau de recalque dos cavacos formados com ferramentas de contato restrito em função da espessura de corte.

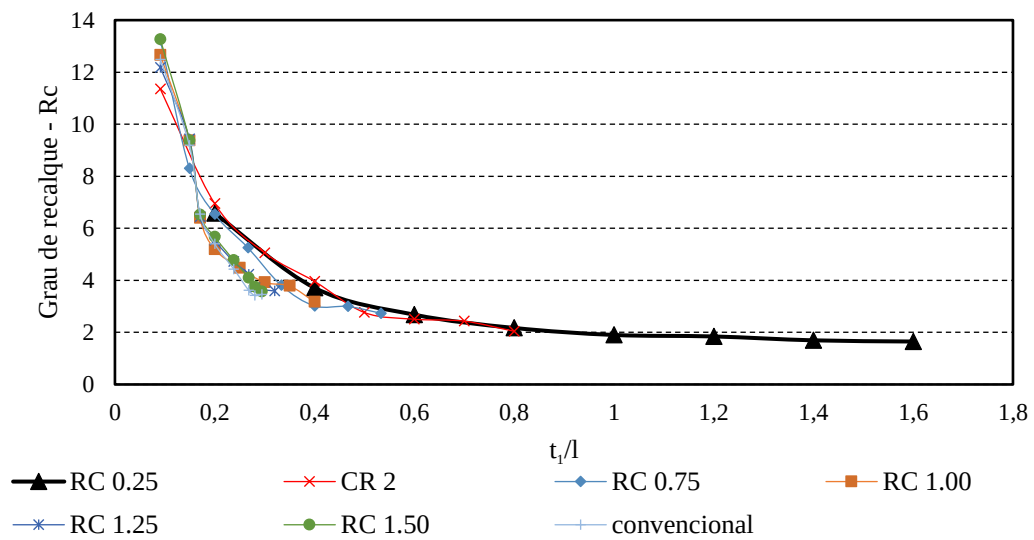


Figura 99: Grau de recalque dos cavacos formados com ferramentas de contato restrito em função da relação t_1/l .

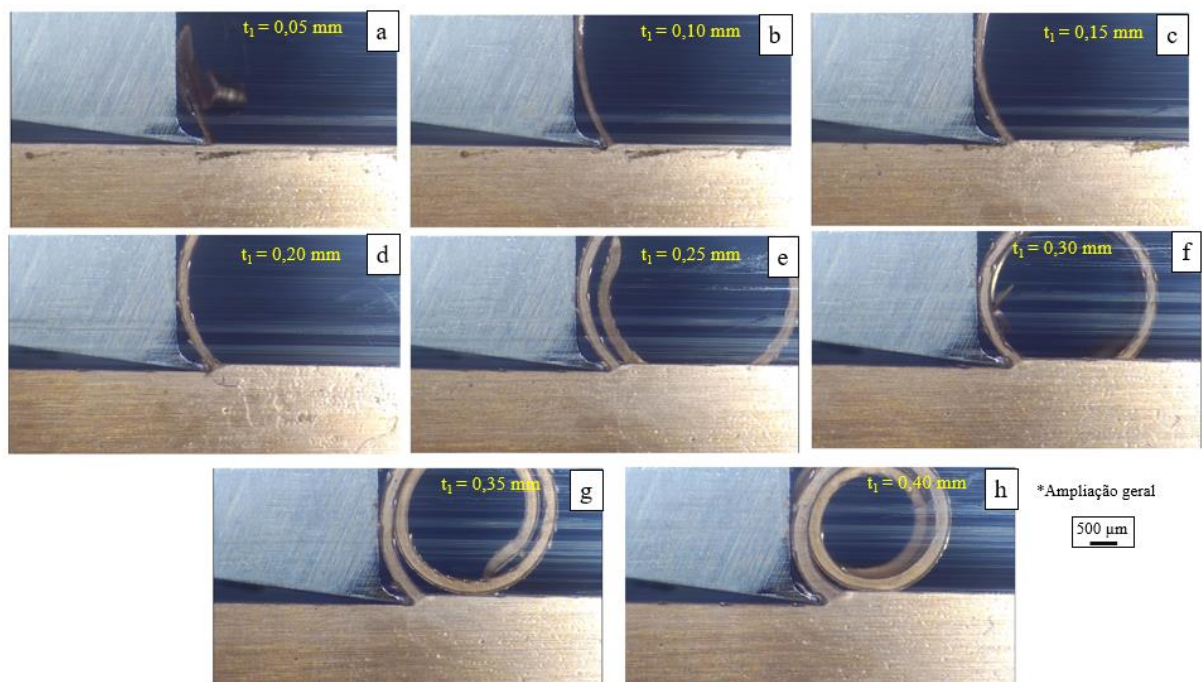


Figura 100: Corte ortogonal com a ferramenta RC0.25 em função da espessura de corte (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

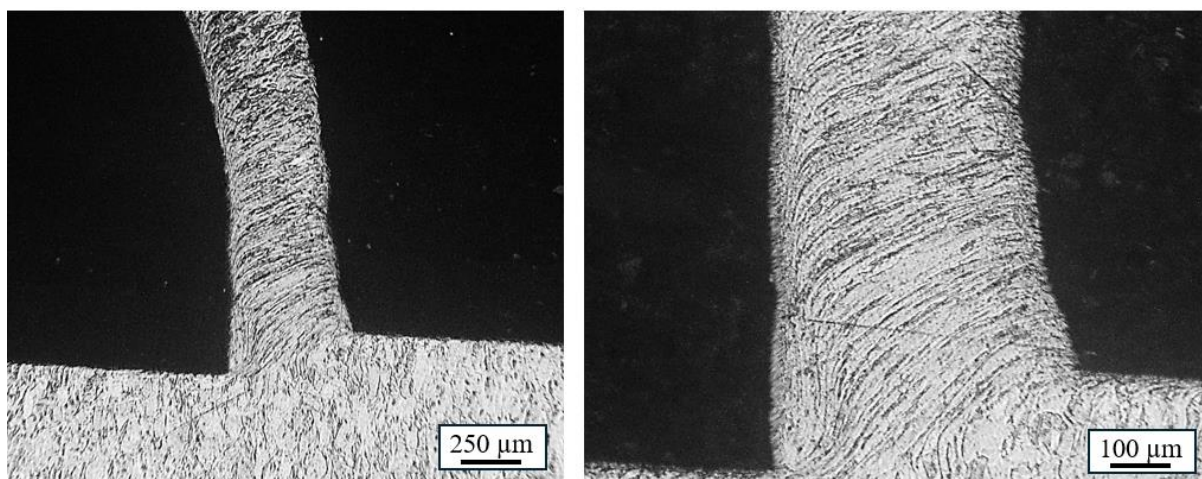


Figura 101: Imagem em QSD para a condição RC0.25 (0,2 mm/rev).

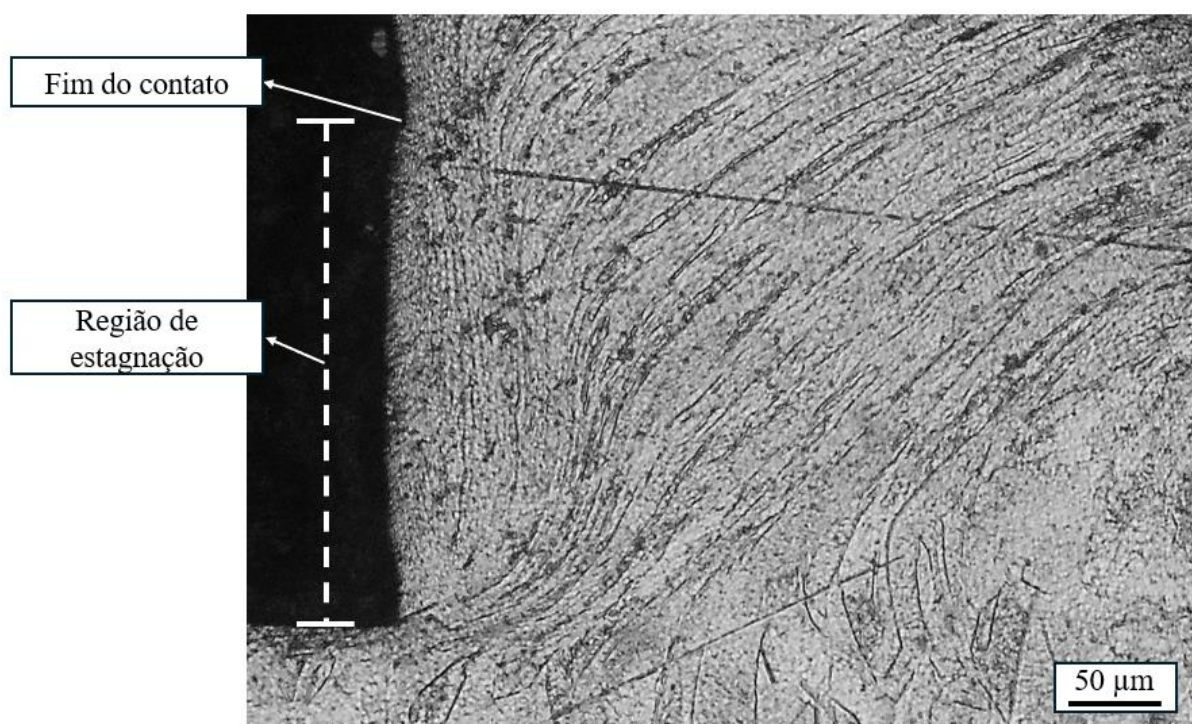


Figura 102: Imagem em QSD para a condição RC0.25 (0,2 mm/rev) com determinação da região de contato.

Assim como mostrado para a ferramenta convencional, a imagem da seção transversal do cavaco obtido com QSD (Figura 101), agora para a ferramenta RC0.25, mostra a condição de deformação do cavaco. De uma maneira distinta a ferramenta convencional, a ferramenta de contato restrito gerou menor encruamento do cavaco, sendo assim possível observar com maior clareza as linhas de fluxo do cavaco. Em detalhe, verifica-se na Figura 102, características da

região de estagnação, compreendendo praticamente todo o comprimento de contato. Esta ferramenta apresentou uma razão de contato de 0,25 e pode elucidar como a redução das regiões de deslizamento podem influenciar no grau de recalque.

A imagens obtidas durante o corte ortogonal com as ferramentas RC0.50 e RC0.75 são apresentadas na Figura 103 e Figura 104, respectivamente. A ferramenta RC0.50, também proporcionou redução geral no grau de recalque, variando de 9 a 40 %, indicando também a influência da redução do comprimento de contato nesse fator. A ferramenta RC0.75, com 0,75 mm de comprimento da superfície de saída, apresentou o limiar para a condição de redução no grau de recalque, que começou a destoar da condição convencional a partir de 0,25 mm de espessura de corte . Apesar dessa redução no grau de recalque, a formação do cavaco para com o uso das ferramentas RC0.50 e RC0.75 mostrou a presença de aresta postiça de corte. A relação dada pela pressão na área de contato pode ser a responsável por este fenômeno, considerando que mantidas as profundidades de corte, a restrição do comprimento da superfície de saída pode aumentar a pressão na interface de contato, culminando para uma maior adesão nesta região.

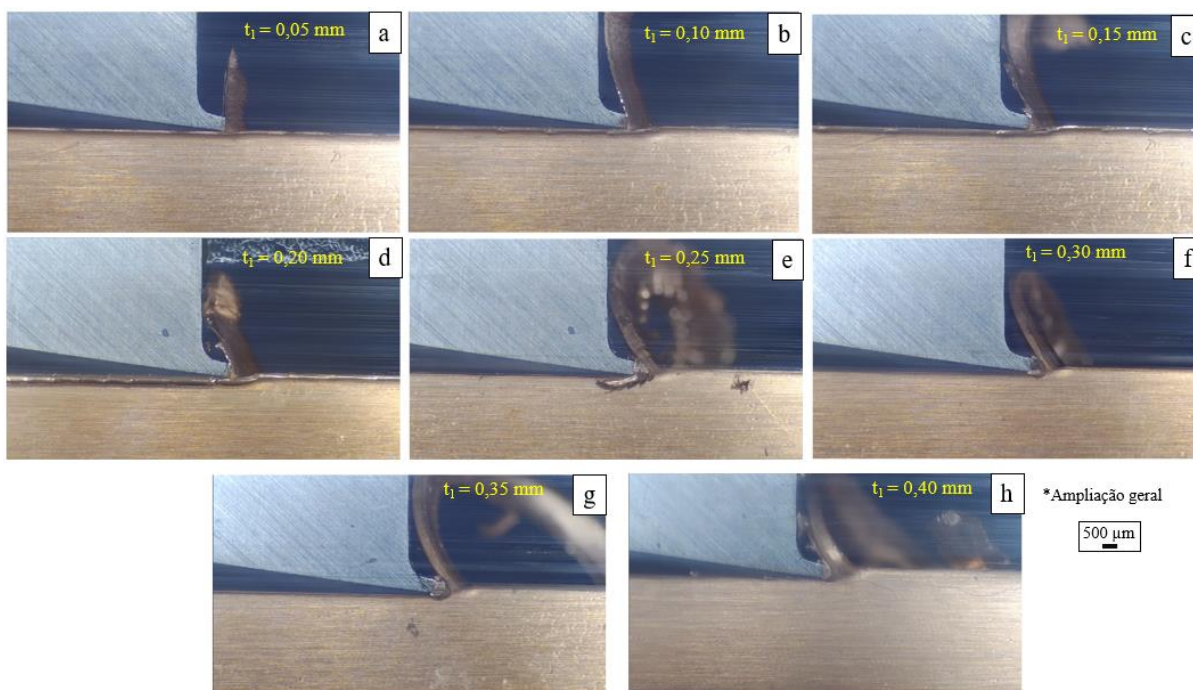


Figura 103: Corte ortogonal com a ferramenta RC0.50 em função da espessura de corte de (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

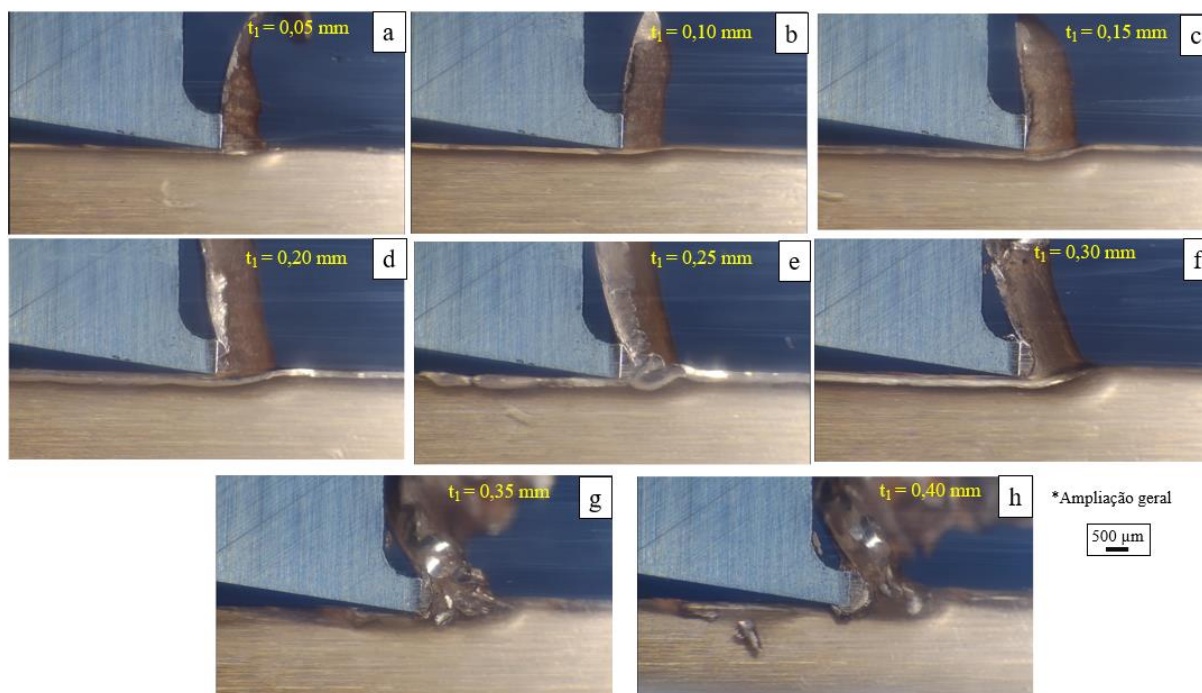


Figura 104: Corte ortogonal com a ferramenta RC0.75 em função da espessura de corte (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

Em sequência, a Figura 105 e Figura 106 mostram respectivamente as imagens obtidas por QSD para as ferramentas RC0.50 e RC0.75. Para as duas condições, o aspecto dos grãos já é semelhante para a condição convencional, ou seja, já houve tempo e solicitação mecânica suficientes para elevar o grau de deformação. A estas duas ferramentas, a presença de trincas no cavaco pode estar relacionada a maior instabilidade provocada pelas arestas postizas de corte. Além disso, a região de contato total entre cavaco e ferramenta é totalmente identificável, visto a deformação do cavaco após ultrapassar a região de contato.

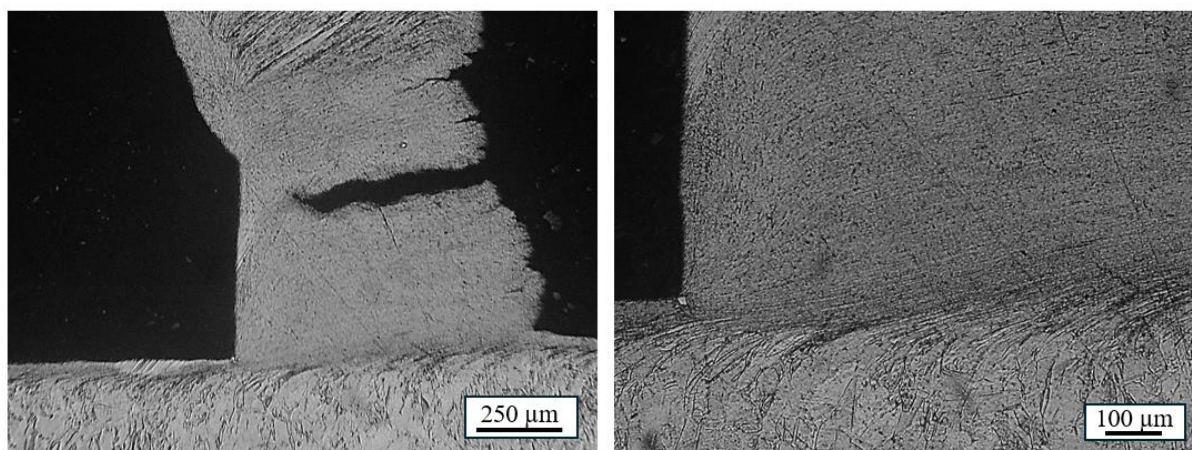


Figura 105: Imagem em QSD para a condição RC0.50 (0,2 mm/rev).

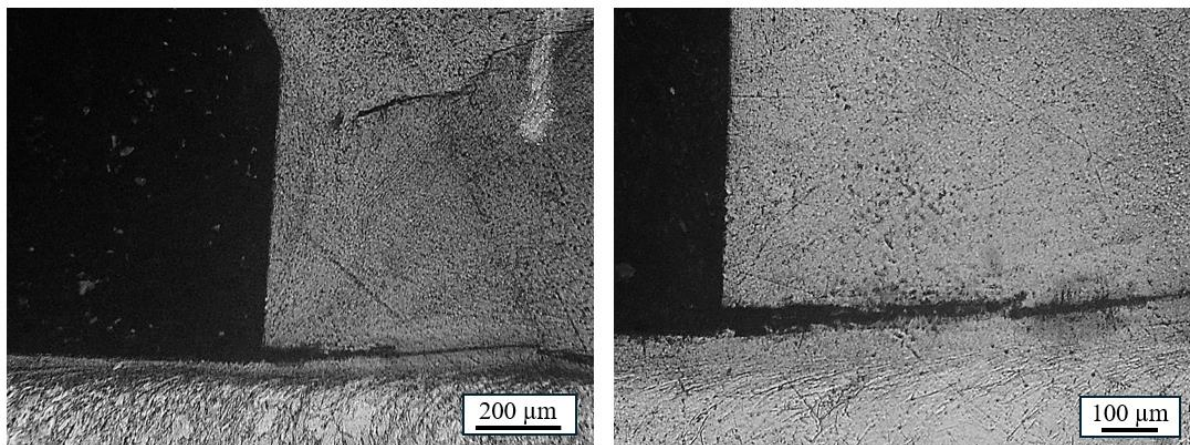


Figura 106: Imagem em QSD para a condição RC0.75 (0,2 mm/rev).

Em sequência, as ferramentas de corte RC1.00, RC1.25 e RC1.50, foram avaliadas no corte ortogonal, sendo apresentadas na Figura 107, Figura 108, Figura 109. A ferramenta RC1.00, apesar de ainda reduzir o comprimento de contato para as profundidades de corte a partir de 0,25 mm, foi fortemente influenciada por adesão na região de contato, como notado na Figura 107. Essa restrição ao escoamento reduziu a velocidade do cavaco e gerou aumento no grau de recalque, deixando-o em valores próximos ao da ferramenta convencional. Por fim, a ferramenta RC1.25 (Figura 108) e a ferramenta RC1.50 (Figura 109), puderam atingir o comprimento de contato natural para todas as condições, exceto para a espessura de corte de 0,40mm com a ferramenta RC1.25 (Figura 108h), tendo essa também sido influenciada pela presença de adesão e aresta postiça.

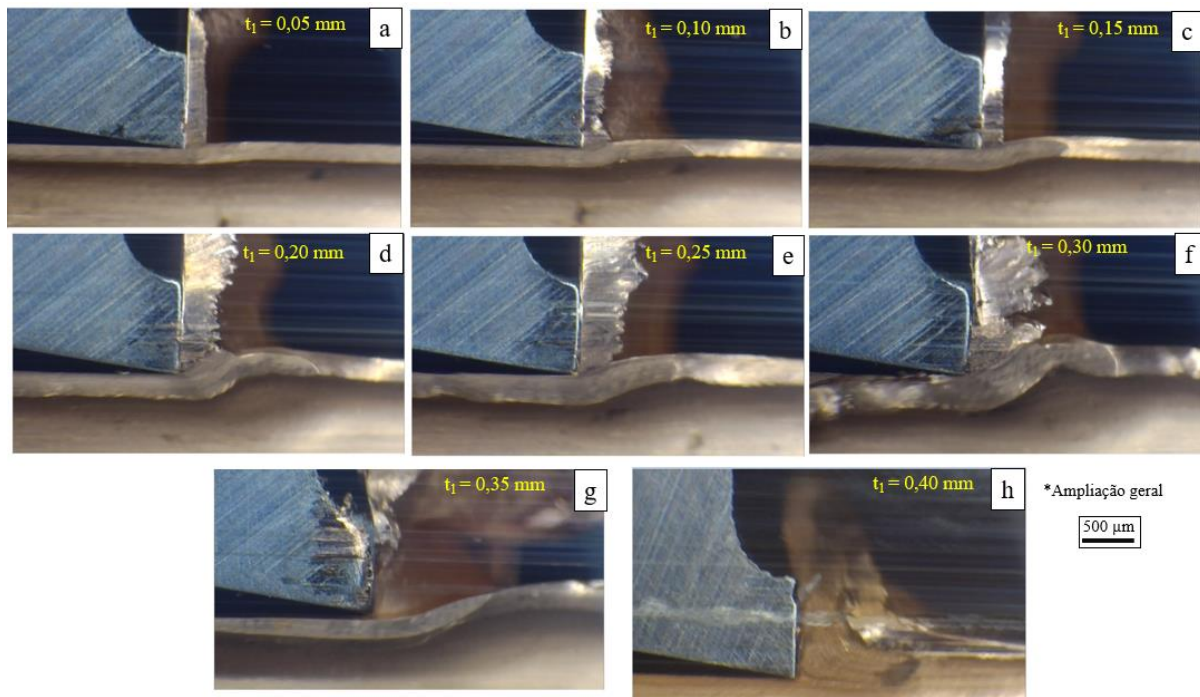


Figura 107: Corte ortogonal com a ferramenta RC1.00 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

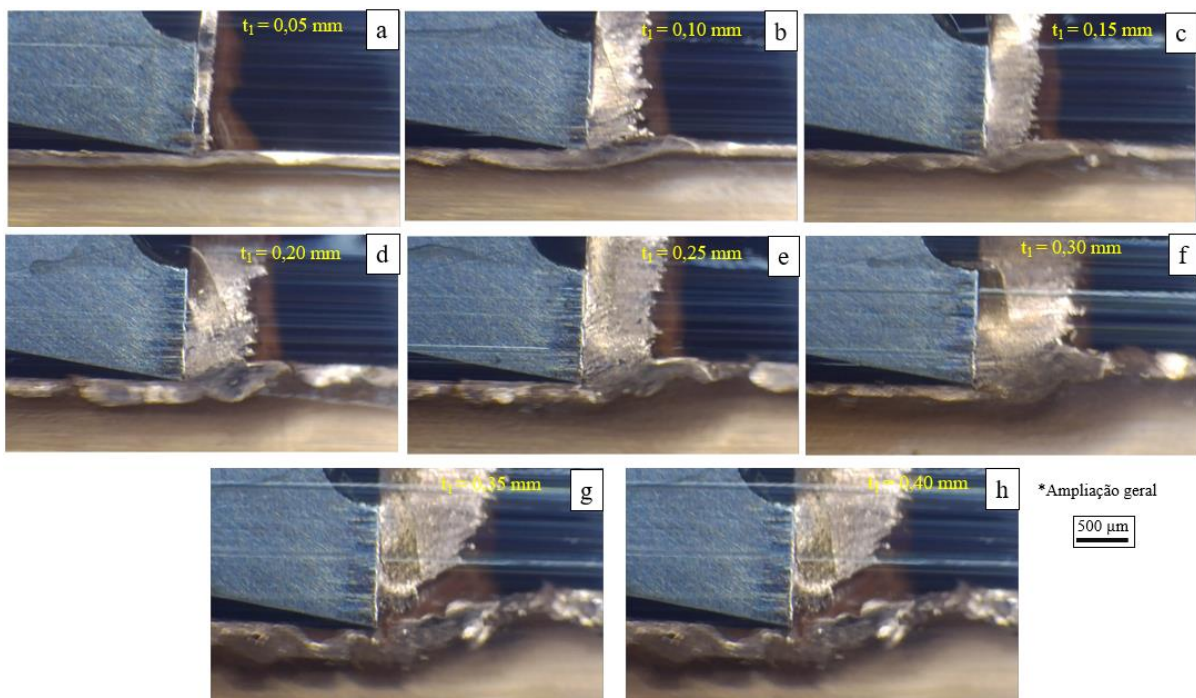


Figura 108: Corte ortogonal com a ferramenta RC1.25 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

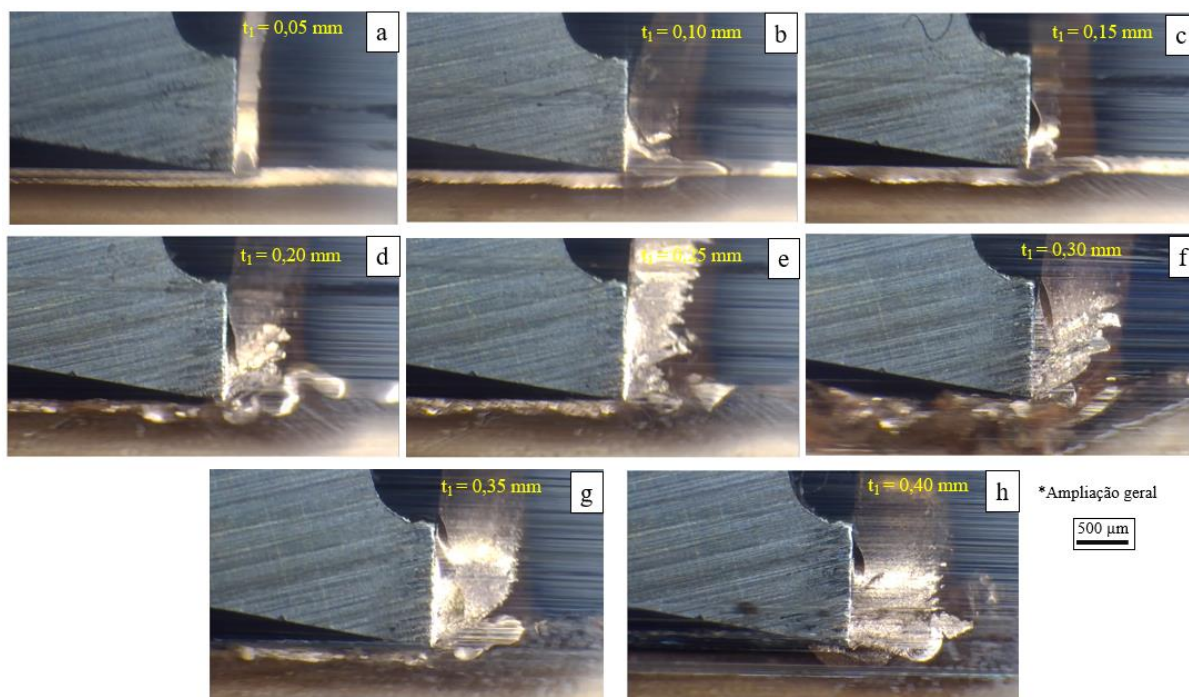


Figura 109: Corte ortogonal com a ferramenta RC1.50 em função da espessura de corte (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

Os pontos apresentados referentes as ferramentas RC1.00 a RC1.50 vem a ser corroborados pelas imagens de QSD realizadas para estas condições. Devido ao aumento de contato promovido gradualmente pelas ferramentas em questão, há o momento em que o contato passa a ser totalmente natural, e isso pode ser observado pela morfologia do cavaco. Na Figura 110, que representa um cavaco obtido com a ferramenta RC1.25, ainda é possível notar o dobramento do cavaco após o final do contato com a superfície de saída restrita em 1,00 mm. Assim como as demais condições, o elevado encruamento do cavaco não permite a observação das linhas de fluxo, mas permite que seja verificada a região do final de contato.



Figura 110: Imagem em QSD para a condição RC1.00 (0,2 mm/rev).

Com a mesma condição de velocidade de corte e velocidade de avanço, é representado na Figura 111 o cavaco obtido com a ferramenta RC1.25. Nessa condição já não é possível identificar o final do contato entre cavaco e ferramenta de corte, tendo em vista que o comprimento de contato de 1,25 mm já permitiu o contato natural entre cavaco e ferramenta de corte. Por fim, o cavaco obtido com a ferramenta de corte RC1.50 (Figura 112) também permitiu o contato natural entre ferramenta de corte e cavaco, considerando o comprimento da superfície de saída de 1,50 mm.

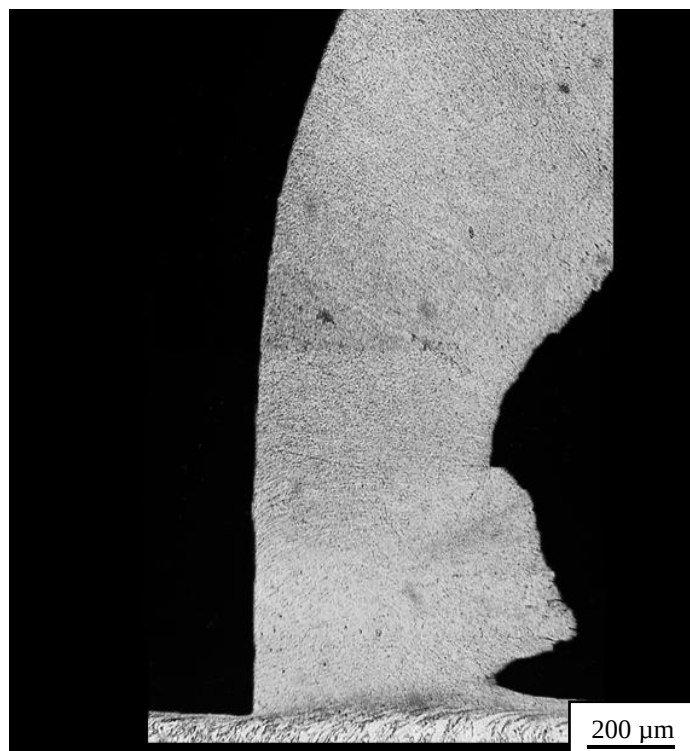


Figura 111: Imagem em QSD para a condição RC1.25 (0,2 mm/rev).

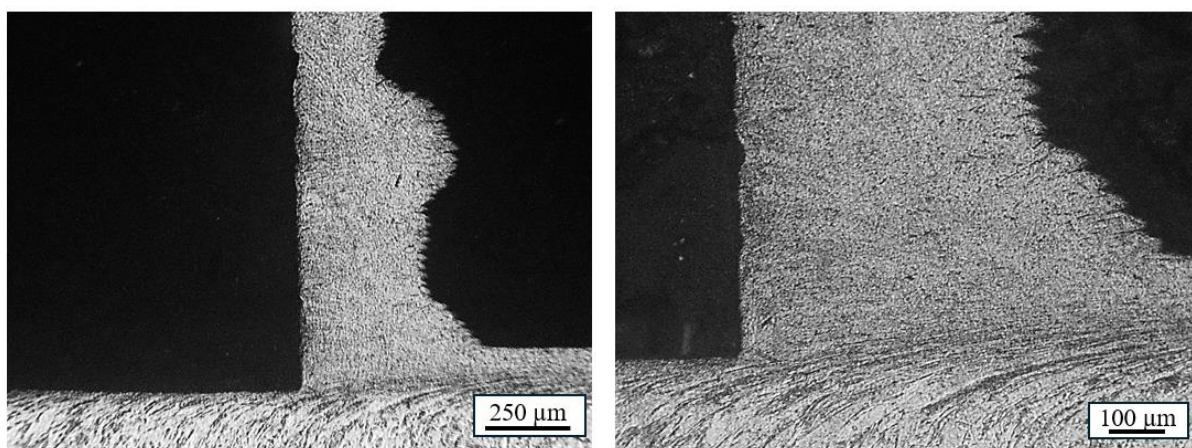


Figura 112: Imagem em QSD para a condição RC1.50 (0,2 mm/rev).

Diante do apresentado, é possível observar pelas imagens a tendência ao dobramento do cavaco em direção a região suprimida da superfície de saída, orientada a esquerda das Figuras conforme a plotagem da Figura 100 à Figura 112, principalmente as condições com maior restrição do comprimento da superfície de saída. Esta curvatura ou dobramento é apresentada por Lo et al. (1966) como ângulo de trajetória do cavaco (η). Os ângulos de trajetória, mostrados na Figura 113 e Tabela 10, apresentam os valores médios obtidos durante a medição das

imagens do corte ortogonal. Como observado nas Figuras anteriores e agora apresentado numericamente, o ângulo tende a zero quando o comprimento de contato é ou se aproxima do comprimento real. No entanto e baseado no apresentado, a adesão e aresta postiça alteram esse ângulo de trajetória, evidenciado na ferramenta RC0.75. Outro ponto importante a se ressaltar é que a partir da ferramenta de corte RC1.00, o cavaco já apresentar tendência a estabilização em um ângulo de trajetória nulo.

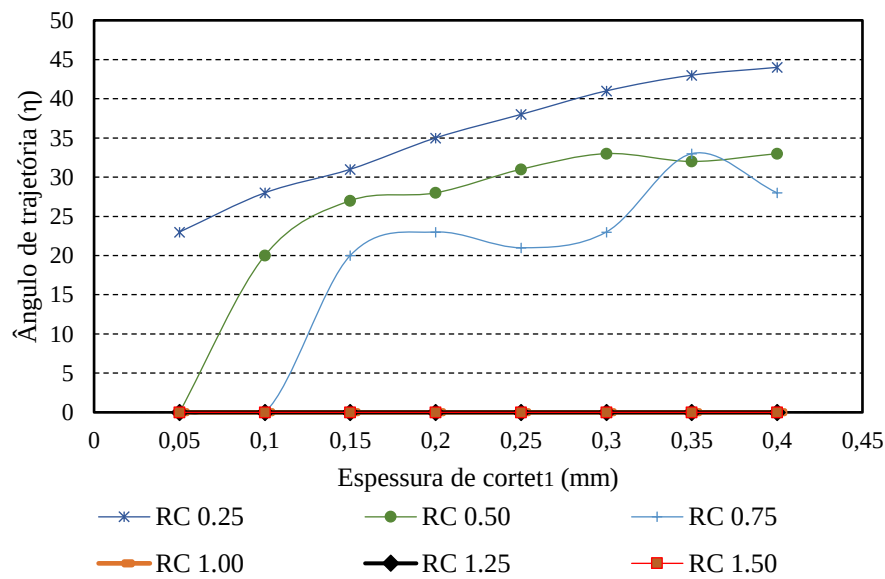


Figura 113: Ângulo de trajetória do cavaco em ferramentas de contato restrito.

Tabela 10: Ângulo de trajetória (η) para ferramentas de contato restrito, em graus.

Espessura de corte , t_1 (mm)	RC0.25	RC0.50	RC0.75	RC1.00	RC1.25	RC1.50
0,05	23	0	0	0	0	0
0,10	28	20	0	0	0	0
0,15	31	27	20	0	0	0
0,20	35	28	23	0	0	0
0,25	38	31	21	0	0	0
0,30	41	33	23	0	0	0
0,35	43	32	33	0	0	0
0,40	44	33	28	0	0	0

4.3.2 Observações diretas na formação do cavaco com ferramentas com microrranhura

A formação de cavaco durante o uso de ferramentas de contato restrito foi apresentada inicialmente de modo a contribuir a discussão subsequente. Como mostrado, apenas a ferramenta RC0.25 pode reduzir o consideravelmente o encruamento do cavaco, sendo nela possível observar as linhas de fluxo. Para as demais, o ângulo de trajetória, gerado devido a restrição da superfície de saída fez com que o cavaco assumisse uma inclinação de até 44°.

As imagens da Figura 114, representam a ferramenta LG0.25 aplicada às oito profundidades de corte. Como visto, o corte derivativo está presente em todas as condições, tendo seu volume gradativamente aumentado em função da espessura de corte. Em sequência, a Figura 115 representa a ferramenta LG0.50, para a qual, é possível observar que na Figura 115a, com 0,05 mm de espessura de corte, não se nota a presença de corte derivativo. Ainda mantendo a largura da microrranhura em 0,35 mm, a ferramenta LG0.75, representada na Figura 116, mostra menor incidência do corte derivativo, até a profundidade de 0,20 mm.

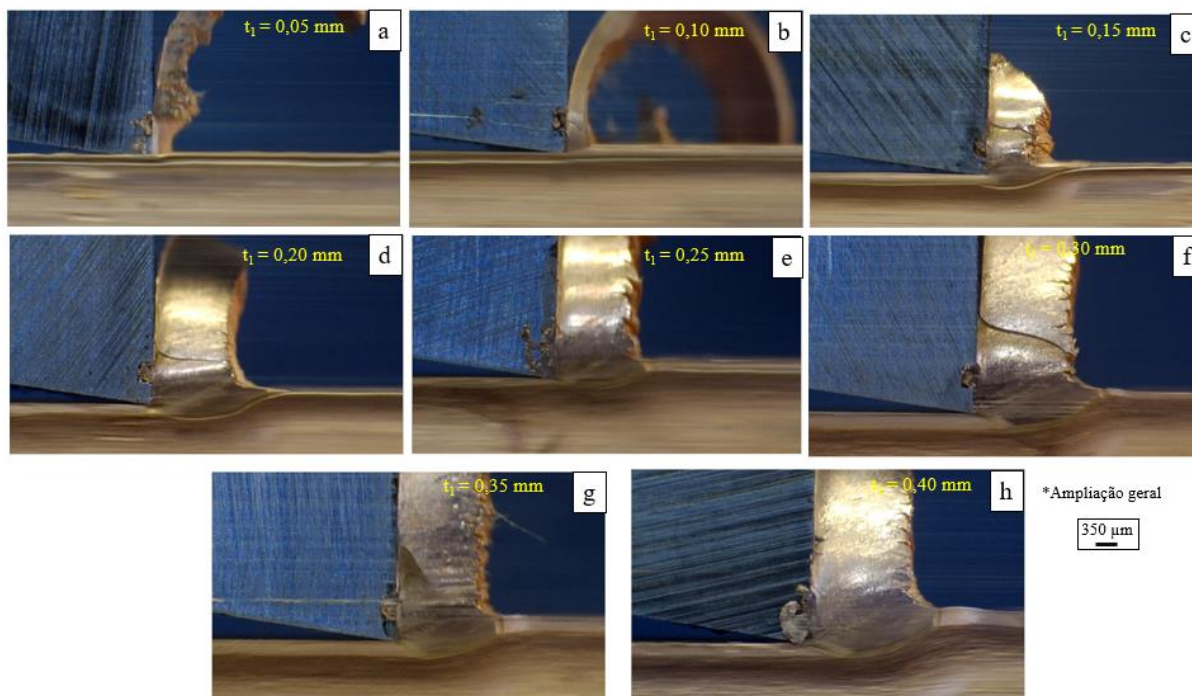


Figura 114: Corte ortogonal com a ferramenta LG0.25 em função da espessura de corte (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

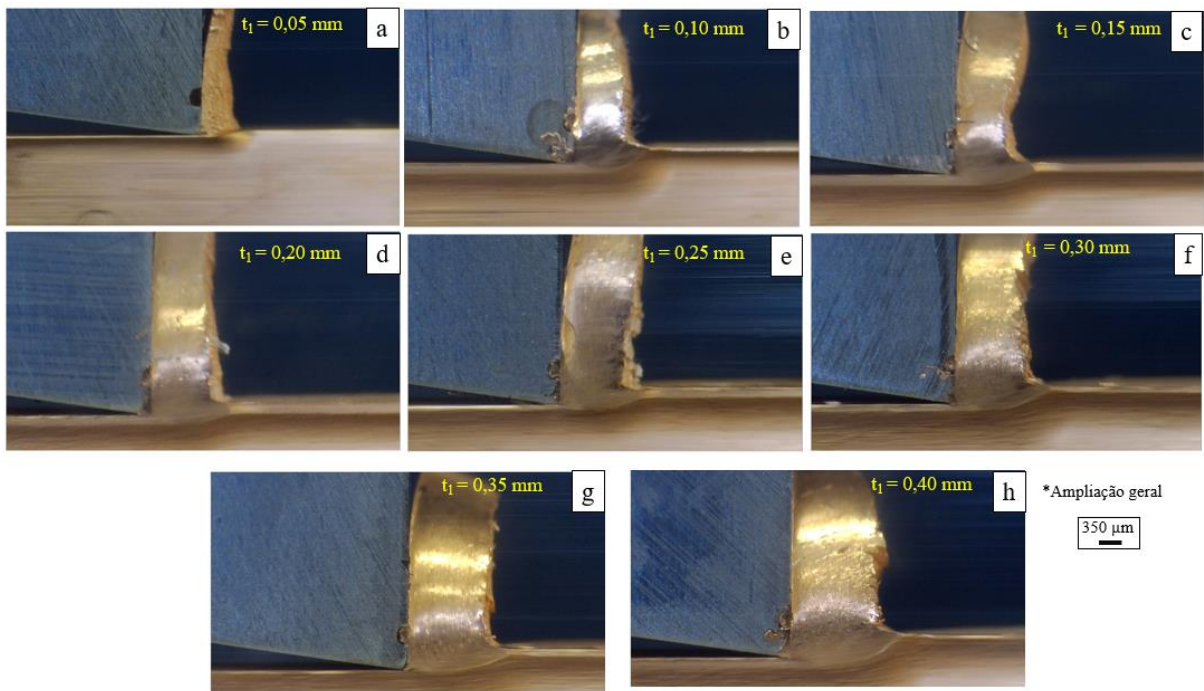


Figura 115: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.50 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

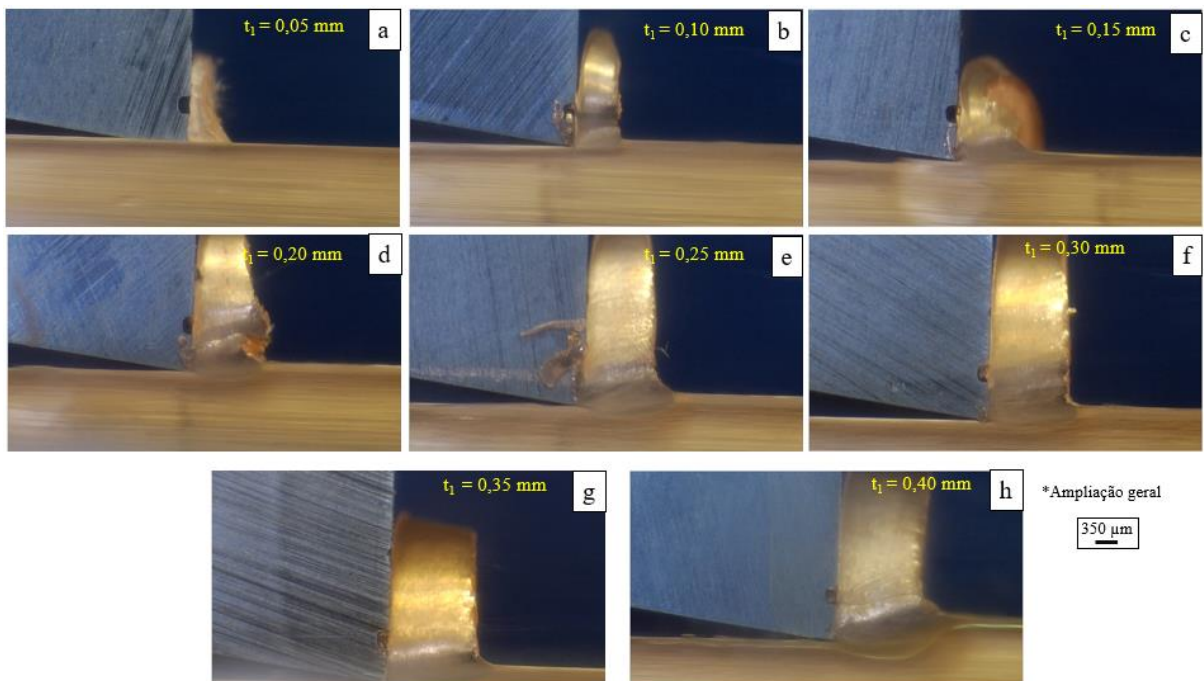


Figura 116: Corte ortogonal com a ferramenta LG0.75 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

O fato de as mencionadas condições mostrarem menores ou maiores volumes de corte derivativo, ainda não pode ser determinístico na condição de eficácia da posição da microrranhura. Certamente, a posição da microrranhura aliada a espessura de corte pode mudar as condições de escoamento do cavaco e alterou os perfis de contato entre cavaco e ferramenta de corte.

De maneira semelhante, as ferramentas SG0.25, SG0.50 e SG0.75 foram observadas nas mesmas condições das anteriores. As condições obtidas com a ferramenta SG0.25, apresentadas na Figura 117 mostram que o corte derivativo também esteve presente. Similarmente as ferramentas com microrranhuras de 0,35 mm, o aumento da distância da microrranhura da aresta de corte reduziu a formação do corte derivativo, mas não a eliminou. Na Figura 118 que representa a ferramenta SG0.50, é notável com maior clareza que a espessura de corte de 0,10 e 0,15 mm estão sem a presença do corte derivativo no dado instante. Com a ferramenta SG0.75 indicada na Figura 119, é observada que a maior magnitude de corte derivativo ocorre a partir de uma profundidade de 0,25 mm

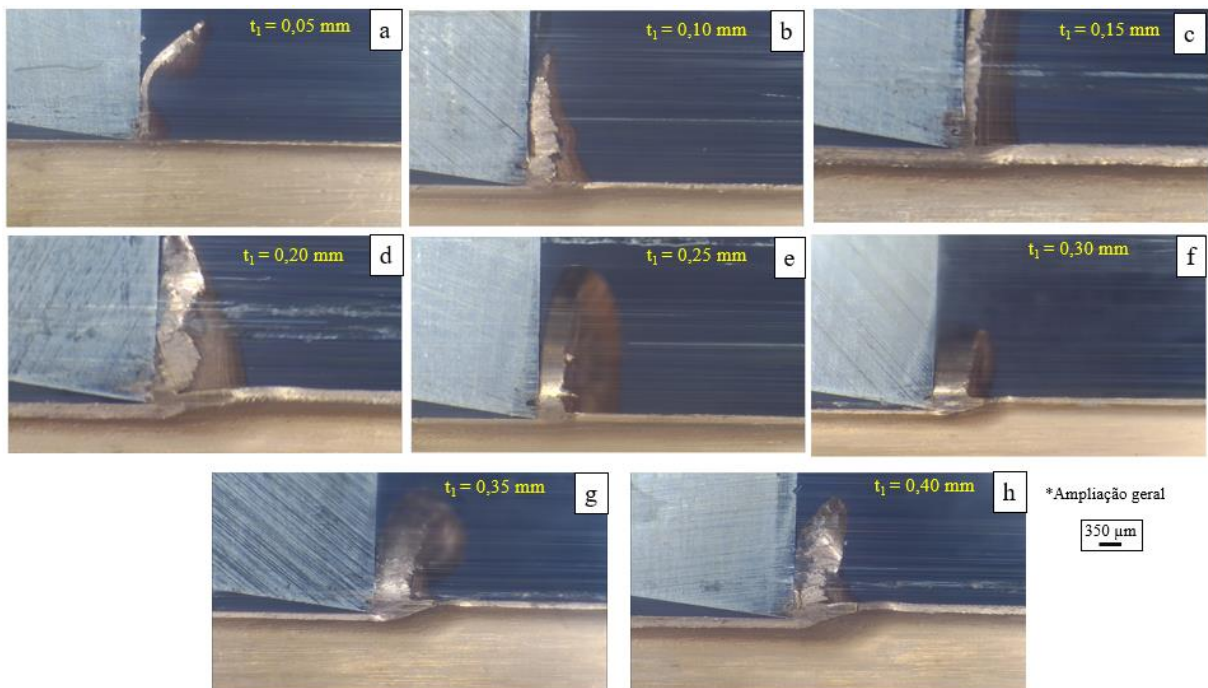


Figura 117: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.25 em função da espessura de corte de (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

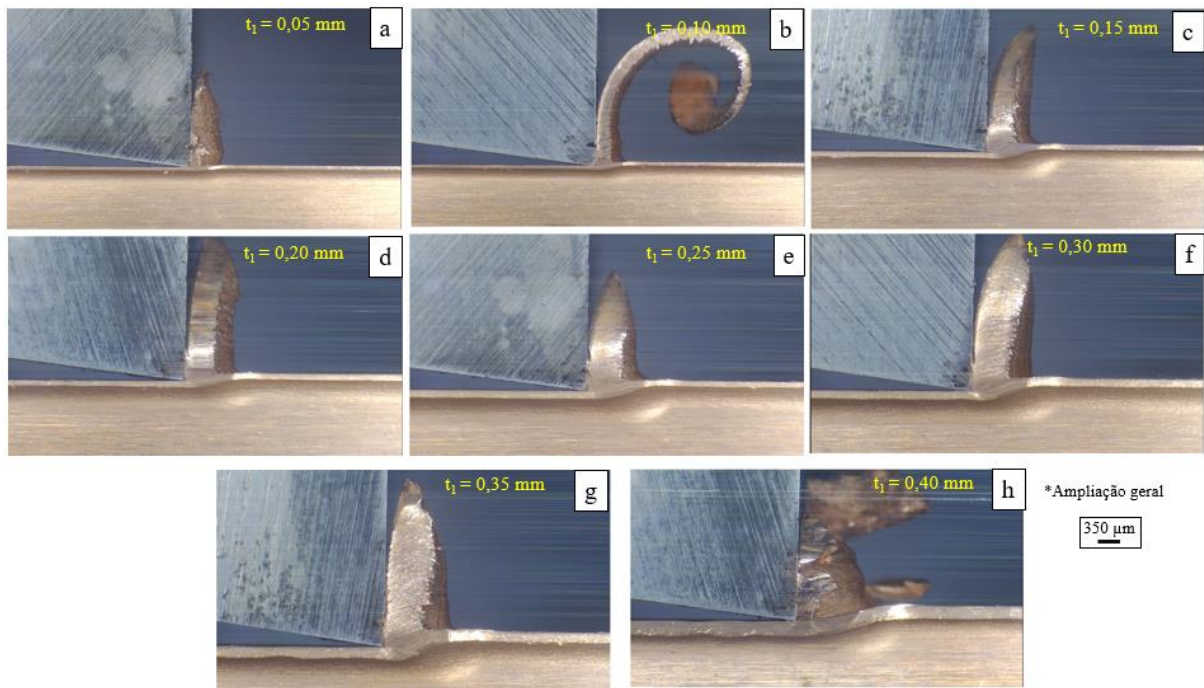


Figura 118: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.50 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

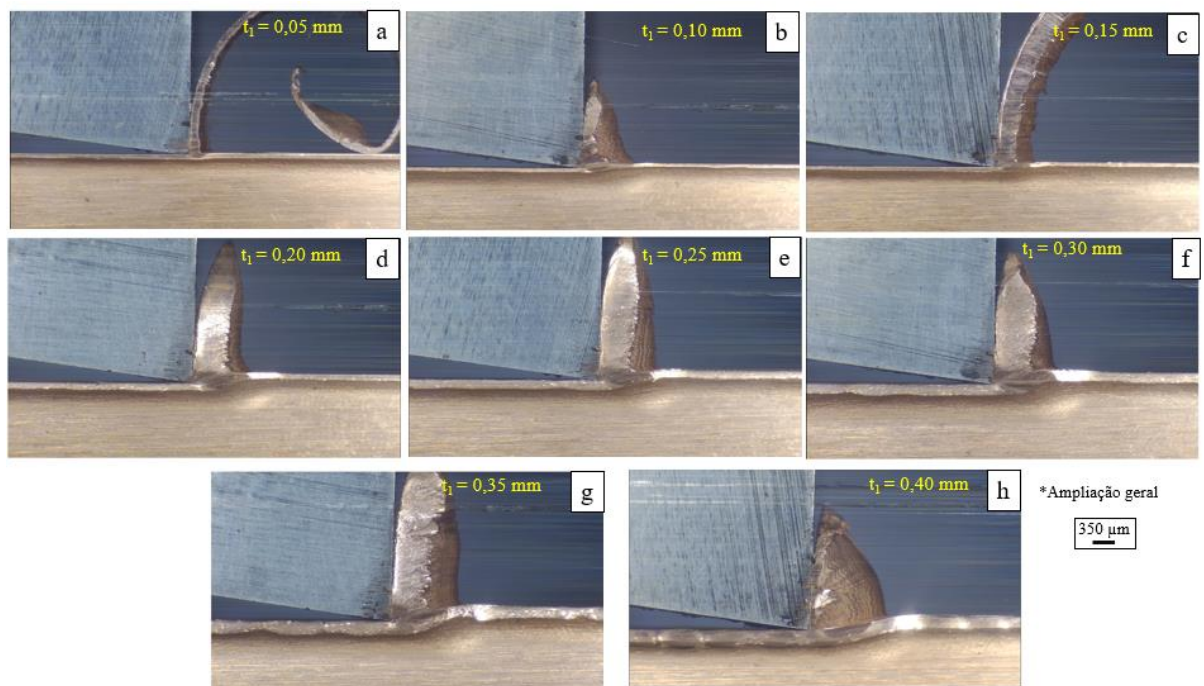


Figura 119: Corte ortogonal com a ferramenta SG0.75 em função da espessura de cortede (a) 0,05 mm; (b) 0,10 mm; (c) 0,15 mm; (d) 0,20 mm; (e) 0,25 mm; (f) 0,30 mm; (g) 0,35 mm; e (h) 0,40 mm.

As observações em vídeo mostram que, a posição da microrranhura relativa à aresta de corte pode reduzir a formação de corte derivativo. Entretanto, a eficácia do posicionamento das microrranhuras ainda carece de mais dados, haja visto o aumento do comprimento de contato em função do afastamento da microrranhura. Além disso, tomando-se com referência a aplicação de apenas uma microrranhura, foi determinado na seção que tratou sobre o comprimento de contato que as microrranhuras de 0,35 mm foram mais eficazes em termos de contato efetivo, se comparado as ferramentas com microrranhuras de 0,15 mm. Nesse quesito, é justificável que a aplicação de um maior número de microrranhuras poderia promover melhores condições de contato efetivo.

Outrossim, foram identificadas duas situações distintas para a formação do corte derivativo. A primeira, os cavacos escoam por cima da microrranhura e, ao entrar em contato com a aresta final da microrranhura, ocorre um novo ciclo de formação de cavaco, comumente denominado como corte derivativo, representado na Figura 120a. Na segunda, induzido pelo ângulo de trajetória, o cavaco tende a se deformar para dentro da microrranhura, o que gera um corte derivativo mais severo, representado na Figura 120b. Dessa forma, se propõe a definição de corte derivativo e o corte derivativo induzido.

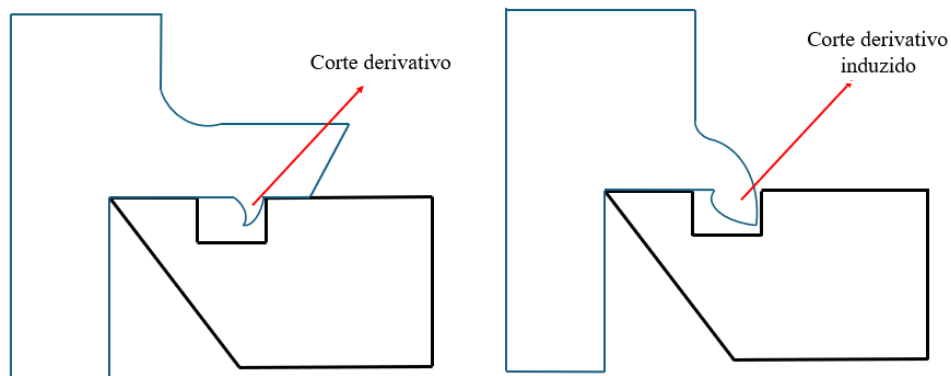


Figura 120: Comparação entre (a) corte derivativo e (b) corte derivativo induzido.

Com isso, o entupimento das microrranhuras por resíduos é mais coerente do ponto de vista do corte derivativo ao invés do acúmulo de detritos da usinagem. Um ponto interessante é que isso ocorre desde o início da usinagem, o que impõe ao projeto de ferramentas estruturas o controle e cuidado neste quesito. A condição de corte derivativo apresentado na Figura 121 indica que aos 0,153 segundos de usinagem a extremidade do cavaco ultrapassa a aresta final

da microrranhura e aos 0,187 segundos de usinagem, inicia-se o recalque na extremidade da microrranhura, e a partir de 0,221 segundos inicia-se o corte derivativo.

No corte derivativo induzido, mostrado na Figura 122, aos 0,068 segundos já é notável o ângulo e trajetória e aos 0,102 segundos a extremidade do cavaco toca a lateral da microrranhura e, aos 0,187 segundos o já existe o corte derivativo induzido pelo ângulo de trajetória, de forma a gerar um preenchimento mais rápido da microrranhura.

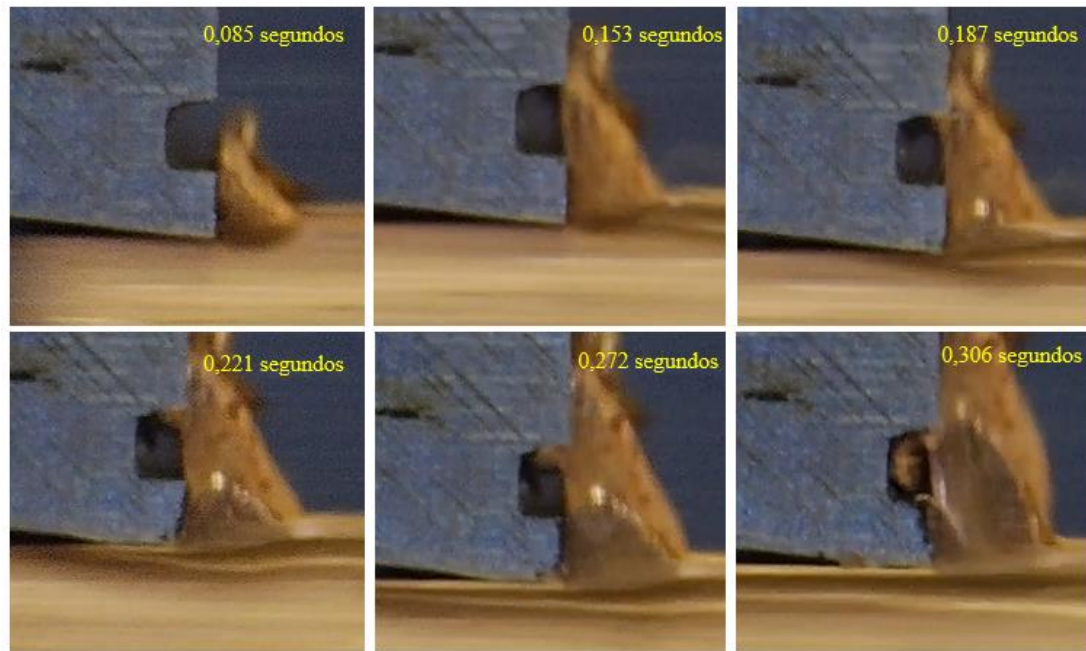


Figura 121: Corte derivativo na ferramenta LG0.25 ($t_1 = 0,10$ mm)

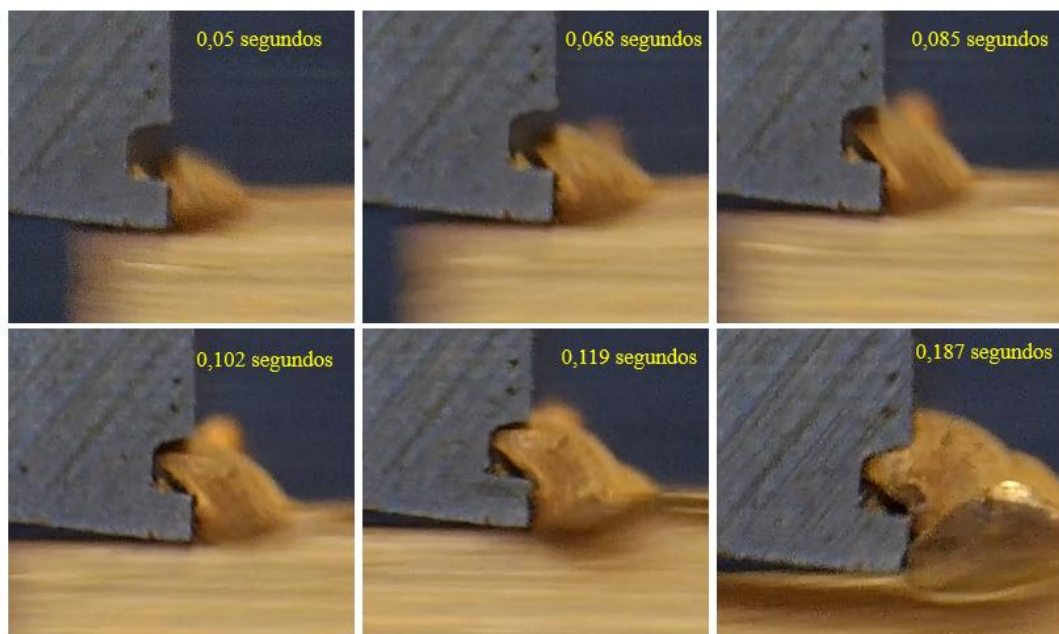


Figura 122: Corte derivativo com deformação inicial na ferramenta LG0.25 ($t_1 = 0,15$ mm)

Tomando como referência a mesma posição inicial da microrranhura e alterando-se a largura, a ferramenta de corte com microrranhuras mais estreitas também apresentou o corte derivativo e o corte derivativo induzido pelo ângulo de trajetória. Na Figura 123, é possível observar que a 0,153 segundos o cavaco já transpassa a microrranhura e a 0,238 segundos o corte derivativo se inicia na aresta da microrranhura. Aumentando a espessura de corte para 0,15 mm, em 0,068 segundos, o cavaco induzido pelo ângulo de trajetória passa a ter seu deslocamento induzido para dentro da microrranhura (Figura 124). Em comparação a largura das microrranhuras, as microrranhuras mais largas permitem maior tempo de redução do contato, tendo em vista a sua maior dimensão. Em relação ao corte derivativo induzido, é observado que a maior largura da microrranhura permite que uma maior porção do cavaco penetre a região, enquanto para microrranhuras menores, há uma menor concentração dos cavacos secundários na parte inferior da microrranhura.



Figura 123: Corte derivativo com deformação inicial na ferramenta SG0.25 ($t_1 = 0,10$ mm)

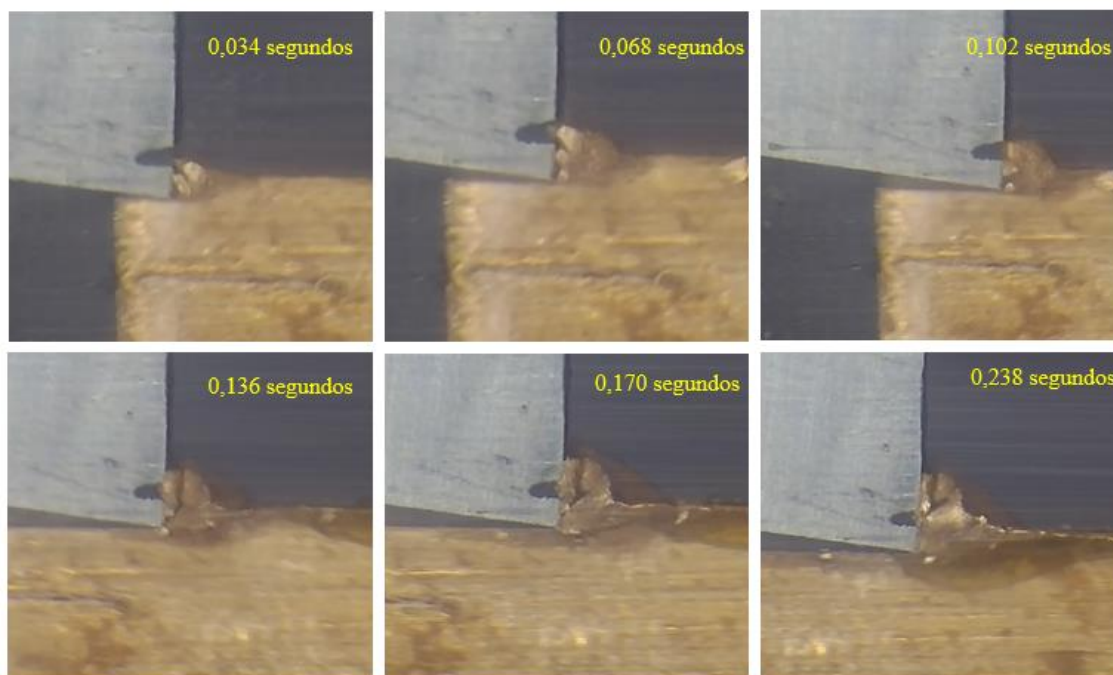


Figura 124: Corte derivativo com deformação inicial na ferramenta SG0.25 ($t_1 = 0,15$ mm)

A Tabela 11 apresenta um comparativo entre as ferramentas com microrranhura e as respectivas ferramentas restritas, para as quais foram representados os valores dos ângulos de trajetórias e as características das microrranhuras. As ferramentas de corte RC1.00 à RC1.50 não foram representadas nesta tabela, tendo em vista que para as citadas, o ângulo de trajetória foi definido como nulo (Figura 113 e Tabela 10). Tomando como referência o comprimento da superfície de saída de 0,25 mm para a ferramenta RC0.25 e as ferramentas de corte LG0.25 e SG0.25, é possível determinar a presença de corte derivativo induzido a partir da espessura de corte de 0,15 mm, inferindo que o ângulo de trajetória de 31° pode ter sido influente para a formação do corte derivativo induzido. Através da filmagem, foi identificado que para as ferramentas LG0.25 e SG0.25, o corte derivativo ocorreu até 0,10 mm de espessura de corte que, ao aumentar-se a espessura de corte para 0,15 mm, o ângulo de trajetória induziu o cavaco para dentro da microrranhura.

Tabela 11: Ocorrência de corte derivativo comum e corte derivativo induzido para várias condições.

Ferramenta	Ocorrência do corte derivativo em relação à espessura de corte	Ocorrência do corte derivativo induzido em relação à espessura de corte	Ângulo de trajetória do cavaco na ferramenta restrita correspondente a espessura de corte derivativo induzido
LG0.25	até 0,10 mm	a partir de 0,15 mm	CR1 – 31°
LG0.50	até 0,10 mm	a partir de 0,15 mm	CR2 – 27°
LG0.75	até 0,25 mm	a partir de 0,25 mm	CR3 – 21°
SG0.25	até 0,10 mm	a partir de 0,15 mm	CR1 – 31°
SG0.50	até 0,25 mm	a partir de 0,25 mm	CR2 – 31°
SG0.75	até 0,40 mm	sem ocorrência visível	-

Tal observação é reforçada pela representação da Figura 125. Tomada como referência um dado instante de usinagem para a ferramenta RC0.25, foram representadas em escala os perfis das ferramentas LG0.25 e LG0.50. Nesta representação, fica evidente que a restrição da área de contato não gera encruamento suficiente ao cavaco para que ele escoe perpendicularmente a superfície de saída, culminando na trajetória coincidente do cavaco para dentro da microrranhura.

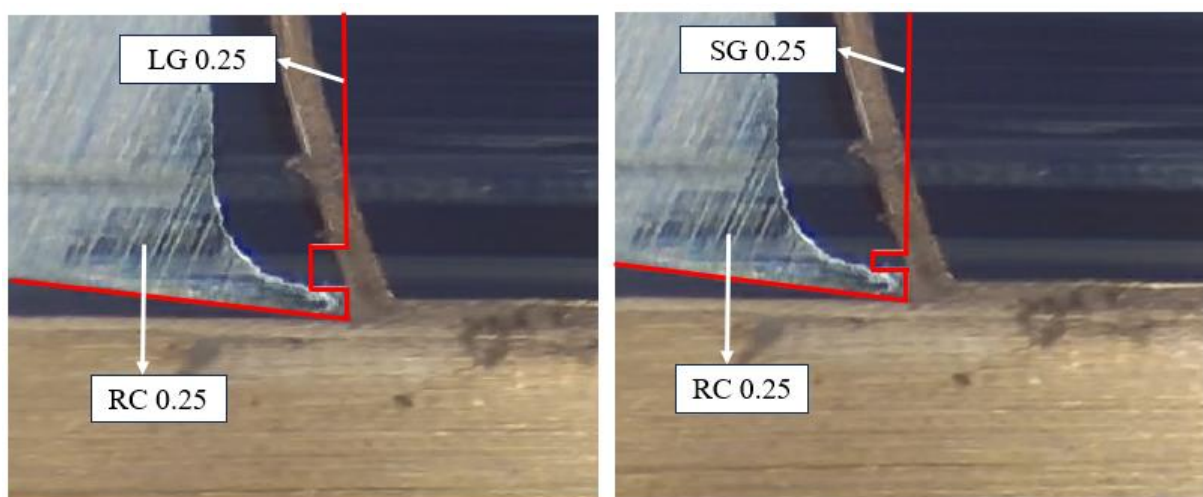


Figura 125: Perfis da ferramenta de contato restrito (RC0.25) com imagem virtual sobreposta da ferramenta com microrranhura (a) LG0.25 e (b) SG0.25.

O modelo proposto por Duan et al. (2018a) determina que o corte derivativo possa ocorrer de duas maneiras, sendo a primeira quando a espessura indeformada mínima do cavaco derivativo (t_{dm}) permite que o cavaco de deforme na aresta da microrranhura, gerando *ploughing*. Na segunda, a espessura indeformada do cavaco (t_d) ultrapassa o valor mínimo (t_{dm}), ocorrendo então o corte derivativo. Duan et al. (2018a) ainda pontua que a formação do corte derivativo é afetada pelo raio da aresta da microrranhura (r_d), pelo ângulo de atrito (β) e pelo ângulo de estagnação (θ). Considerando que as forças de corte foram medidas para todas as ferramentas com microrranhura, foram calculados os ângulos de cisalhamento para todas as condições através da relação F_t/F_n , Shaw (2005), apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Ângulo de atrito β para todas as condições avaliadas (°)

Ferramenta	Espessura de corte– t_1 (mm)							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Convencional	22,1	24,9	25,3	22,5	21,6	19,8	18,7	22,8
LG0.25	26,9	26,9	19,9	22,8	19,7	23,5	21,3	20,3
LG0.50	26,7	22,8	26,4	22,8	21,7	19,9	22,3	20,8
LG0.75	27,6	22,9	27,4	21,0	21,6	19,6	22,4	20,4
SG0.25	35,7	22,5	29,4	21,9	24,3	20,9	21,6	23,7
SG0.50	28,2	28,9	26,3	26,5	26,7	23,9	26,6	22,3
SG0.75	25,2	29,1	24,1	24,6	24,0	24,2	20,4	20,1
RC0.25	22,3	15,9	15,1	12,5	11,6	11,8	11,2	12,7
RC0.50	23,4	23,8	23,9	20,9	22,9	20,7	19,1	18,9
RC0.75	22,8	23,8	24,9	24,6	21,5	20,3	18,3	18,3
RC1.00	20,7	24,7	25,0	22,8	22,7	19,1	18,8	17,5
RC1.25	21,4	24,8	25,1	22,4	22,8	19,7	20,5	19,2
RC1.50	21,6	24,7	24,4	22,8	21,3	18,4	18,4	21,7

Com esses resultados e de acordo com as Equações (5) e (6), foram calculadas as espessuras indeformadas mínima do cavaco derivativo através da determinação do ângulo de contato na borda da microrranhura, tendo em vista que o raio da borda da microrranhura foi medido em 20 μ m. Os valores do ângulo de contato são mostrados na Tabela 13, enquanto os valores da espessura mínima do cavaco indeformado do corte derivativo são apresentados na Tabela 14.

Tabela 13: Ângulo de contato θ para ferramentas de corte com microrranhura ($^{\circ}$)

Ferramenta	Espessura de corte- t_1 (mm)							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
LG0.25	76,5	76,5	80,1	78,6	80,1	78,2	79,4	79,8
LG0.50	76,6	78,6	76,8	78,6	79,2	80,0	78,9	79,6
LG0.75	76,2	78,5	76,3	79,5	79,2	80,2	78,8	79,8
SG0.25	72,1	78,7	75,3	79,0	77,8	79,6	79,2	78,1
SG0.50	75,9	75,5	76,9	76,8	76,6	78,1	76,7	78,8
SG0.75	77,4	75,5	77,9	77,7	78,0	77,9	79,8	80,0

Tabela 14: Espessura indeformada mínima do cavaco derivativo - t_{dm} (μm)

Ferramenta	Espessura de corte- t_1 (mm)							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
LG0.25	15,3	15,3	16,5	16,1	16,6	15,9	16,3	16,5
LG0.50	15,4	16,0	15,4	16,1	16,2	16,5	16,1	16,4
LG0.75	15,2	16,0	15,3	16,4	16,2	16,6	16,1	16,5
SG0.25	13,9	16,1	14,9	16,2	15,8	16,4	16,3	15,9
SG0.50	15,1	15,0	15,5	15,4	15,4	15,9	15,4	16,1
SG0.75	15,6	15,0	15,8	15,7	15,8	15,8	16,5	16,5

Em vermelho: corte derivativo induzido

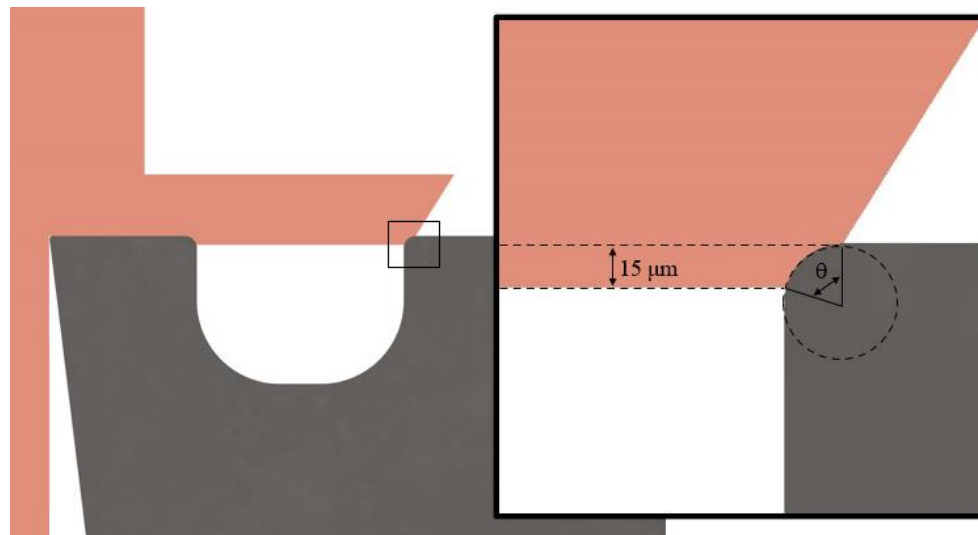


Figura 126: Representação da espessura mínima de cavaco indeformado do corte derivativo (t_{dm})

Os valores de t_{dm} variaram entre 13,9 e 16,6 μm , mostrando que estas seriam as condições ideais para que ocorressem o *ploughing*, e não o corte derivativo, segundo o modelo de Duan et al. (2018a). Os valores apresentados em vermelho na Tabela 14 apresentam os

pontos ocorrentes de corte derivativo induzido, enquanto a Figura 126 mostra uma representação em escala, do que seria um valor de t_{dm} de 15 μm em contato com a aresta da microrranhura com raio de 20 μm , representando aproximadamente o valor médio de t_{dm} . Levando em consideração as condições de corte derivativo e corte derivativo induzido, a relação de Duan et al. (2018a) para o *ploughing* estaria condicionada a uma combinação entre espessura de corte(ou velocidade de avanço) e posição da microrranhura que culminasse em ângulos de inclinação do cavaco menores ou nulos, de modo que o corte derivativo induzido não ocorresse logo no início do contato. Na presença do corte derivativo induzido, o ângulo de trajetória η tende a gerar um valor crescente espessura de cavaco indeformado (t_d), conforme representado na Figura 127, de modo que há rápido entupimento e perda das propriedades da microrranhura rapidamente. O modelo de Duan et al. (2018a), que leva em consideração a distribuição normal das forças na superfície de saída da ferramenta de corte, não considera os efeitos do ângulo de trajetória do cavaco derivado das análises com ferramentas de contato restrito, ao passo que a predição do corte derivativo não fica clara.

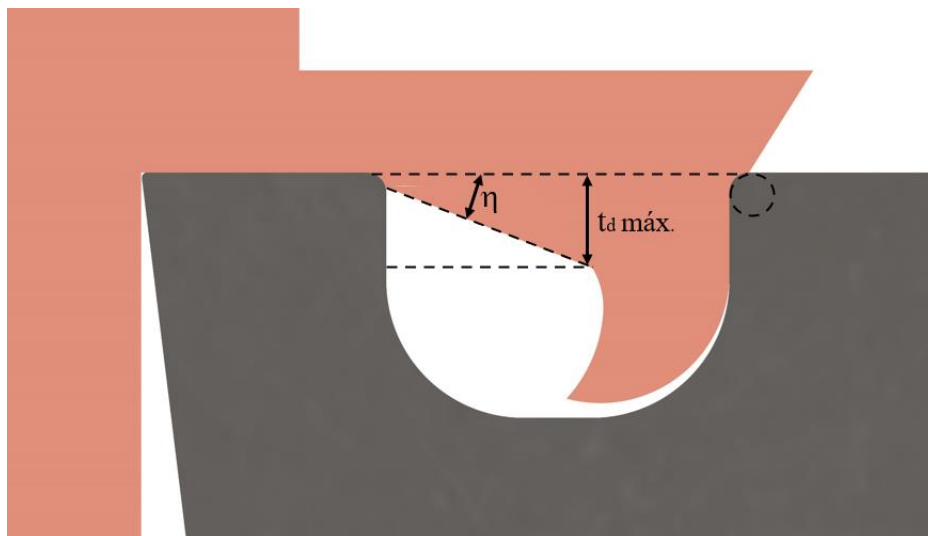


Figura 127: Representação do valor crescente da espessura indeformada do cavaco (t_d) em função do ângulo de trajetória (η).

Porém, no artigo seguinte, Duan et al. (2018b) considera o ângulo de trajetória η e propõe a Equação (12) que relaciona a largura da microrranhura em função do ângulo de trajetória:

$$t_d = l_2 \sin \eta^2 \quad (12)$$

No qual l_2 é a largura da microrranhura e t_d é a espessura indeformado do cavaco derivativo. A Equação (12), aplicada as microrranhuras de 0,15 e 0,35 mm, juntamente aos valores correspondentes dos ângulos de trajetória medidos na Tabela 10, resultam nos valores apresentados na Tabela 15, tendo sido a ocorrência do corte derivativo induzido grifada em vermelho. Os dados apresentados de acordo com a equação de t_d , não seriam totalmente válidos para a presença do corte derivativo induzido. Tal afirmação pode ser identificada através da filmagem das condições. Para tal, a Figura 122, apresenta a ferramenta LG0.25 em uma espessura de corte de 0,15 mm, no qual é possível observar que o cavaco chega a tocar no fundo da microrranhura, que apresenta 250 μm de profundidade, ao passo que a estimativa de t_d para tal condição seria de 92,8 μm . Todavia, por levar em consideração o ângulo de trajetória do cavaco, os dados da Tabela 15 mostram valores iguais a zero coincidentes com a observação de cortes derivativos mais brandos.

Tabela 15: Espessura indeformada do cavaco derivativo - t_d (μm)

Ferramenta	Espessura de corte- t_1 (mm)							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
LG0.25	53,4	77,1	92,8	115,1	132,7	150,6	162,8	168,9
LG0.50	0,0	40,9	72,1	77,1	92,8	103,8	98,3	103,8
LG0.75	0,0	0,0	40,9	53,4	44,9	53,4	103,8	77,1
SG0.25	22,9	33,1	39,8	49,3	56,9	64,6	69,8	72,4
SG0.50	0,0	17,5	30,9	33,1	39,8	44,5	42,1	44,5
SG0.75	0,0	0,0	17,5	22,9	19,3	22,9	44,5	33,1

Em vermelho: corte derivativo induzido

O modelo trazido por Kishawy et al. (2022), que considera o cavaco como uma viga carregada com dois apoios, sendo os apoios as bordas da microrranhura, traz semelhanças com o modelo de Duan et al. (2018a, 2018b). Utilizando a espessura do cavaco derivativo, os autores não consideram o momento inicial do contato entre cavaco e microrranhura, para o qual o ângulo de trajetória faz papel influente no direcionamento do cavaco para dentro da microrranhura.

Tendo em vista que o ângulo de trajetória induz o cavaco para dentro das microrranhuras, gerando assim a característica do corte derivativo induzido, o posicionamento da microrranhura frente a espessura de corte pode ser um fator decisivo ao projeto de ferramentas de corte. Para tanto, a razão entre a espessura de corte(t_1) e a posição da microrranhura (l_1) é novamente apresentada, agora na Tabela 16, apresentando tal relação para todas as condições avaliadas. A representação esquemática da medida l_1 para as ferramentas com microrranhura e ferramentas de contato restrito é apresentada na Figura 128. Grifado em vermelho na Tabela 16, encontram-se os pontos de nos quais ocorreram corte derivativo induzido e em azul, os pontos nos quais ocorreram apenas o corte derivativo. As filmagens realizadas durante usinagem da ferramenta SG0.75 não mostram claramente a presença de corte derivativo induzido. No entanto, a menor largura e maior distanciamento da microrranhura da aresta de corte não foram efetivos para a melhoria das condições de usinagem.

Tabela 16: Relação da posição da microrranhura (l_1), ou início da restrição do contato, em relação a espessura de corte(t_1), (l_1/t_1).

prof. de corte, t_1 (mm)	LG 0.25	LG 0.50	LG 0.75	SG 0.25	SG 0.50	SG 0.75	RC 0.25	RC 0.50	RC 0.75	RC 1.00	RC 1.25	RC 1.50
0,05	5,0	10,0	14,3	5,0	10,0	14,3	5,0	10,0	14,3	20,0	25,0	33,3
0,10	2,5	5,0	7,7	2,5	5,0	7,7	2,5	5,0	7,7	10,0	12,5	14,3
0,15	1,7	3,3	5,0	1,7	3,3	5,0	1,7	3,3	5,0	6,7	8,3	10,0
0,20	1,3	2,5	3,7	1,3	2,5	3,7	1,3	2,5	3,7	5,0	6,3	7,7
0,25	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	5,9
0,30	0,8	1,7	2,5	0,8	1,7	2,5	0,8	1,7	2,5	3,3	4,2	5,0
0,35	0,7	1,4	2,1	0,7	1,4	2,1	0,7	1,4	2,1	2,9	3,6	4,3
0,40	0,6	1,3	1,9	0,6	1,3	1,9	0,6	1,3	1,9	2,5	3,1	3,7

* em vermelho: corte derivativo induzido

* em azul: corte derivativo

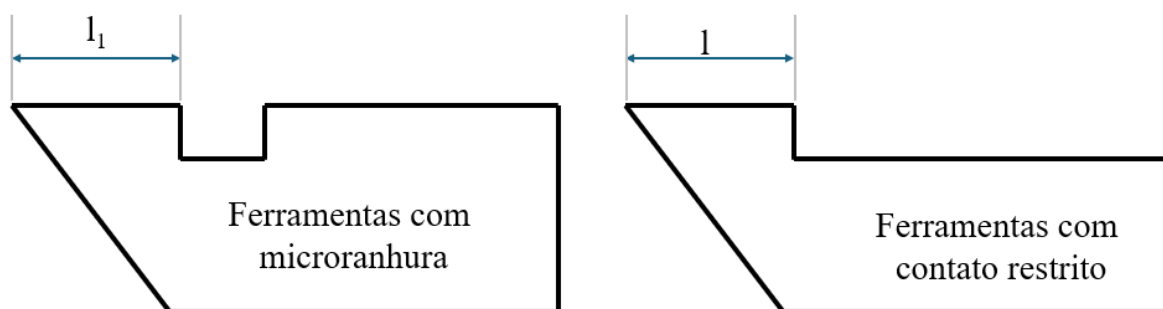


Figura 128: Representação da posição da microrranhura ou do início da restrição de contato (l_1).

A relação decrescente de l_1/t_1 indica a incidência do corte derivativo mais severo ou induzido. De fato, a região 3 apresentada por Sugihara et al. (2021) apresentava valores de l_1/t_1 de 1,33, ao passo que a região 2 apresentou tal relação em 2. Ademais, a não observância do corte derivativo em todas as condições de Sugihara et al. (2021) poderia ser justificada pela adoção de um ângulo de saída de 10° , podendo assim minimizar os efeitos do ângulo de trajetória do cavaco.

As condições experimentais adotadas por Duan et al. (2018a) culminaram nas relações l_1/t_1 de 1,5; 2; 2,5, 3 e 3,5. Em comparação a Sugihara et al. (2021), os autores citados utilizaram ângulo de saída nulo e aço 1045 na usinagem em velocidades de corte de 90 m/min, sendo observadas as melhores relações de l_1/t_1 de 3 e 3,5.

De fato, os valores decrescentes de l_1/t_1 condicionam ao aumento de corte derivativo induzido. À 0,25 mm da aresta de corte, os valores limites de l_1/t_1 foram de 2,5. Afastando a microrranhura para 0,50 mm da aresta de corte, o limite de l_1/t_1 é 5 e 2,5, respectivamente para as microrranhuras de 0,35 e 0,15 mm, indicando que as microrranhuras menores suprimem o corte derivativo induzido, sendo essa observação também válida para as microrranhuras à 0,75 mm da aresta de corte.

As imagens e micrografias obtidas em QSD da seção transversal do cavaco para as dadas condições mostram a presença do corte derivativo induzido (Figura 129). O cavaco secundário de maior volume, obtido com a ferramenta LG0.25 e apresentado na Figura 129b é resultado do contato do cavaco com a lateral da microrranhura. Em comparação ao cavaco obtido com a ferramenta SG0.25, Figura 129c, é possível identificar facilmente seu maior volume, devido a maior largura da microrranhura. A termos de comparação, a Figura 129d apresenta o cavaco obtido com a ferramenta RC0.25, para os quais as linhas de fluxo são mais visíveis. É de se

notar, que os cavacos obtidos com a ferramentas com microrranhura apresentam alto grau de encruamento semelhantes aos cavacos da ferramenta convencional (Figura 129e), não sendo possível verificar alterações microestruturais que possam caracterizar o corte derivativo, exceto pelo montante de cavaco que penetrou a microrranhura.

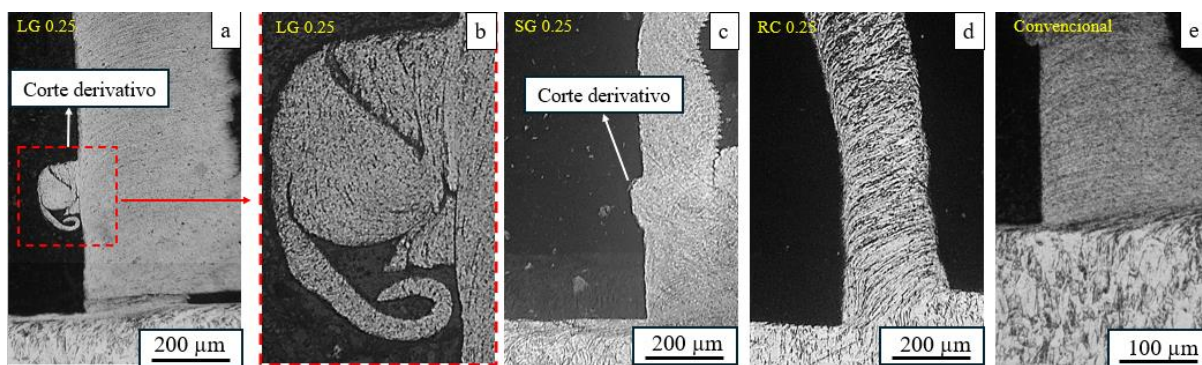


Figura 129: Micrografias dos cavacos em QSD: (a) ferramenta LG0.25; (b) detalhe do cavaco secundário; (c) ferramenta SG0.25; (d) ferramenta RC0.25; e (e) ferramenta convencional.

Considerando que houve diferentes condições de contato e de formação de corte derivativo, há indícios que justificam a avaliação do grau de recalque. Comparando os graus de recalque apresentados na Figura 130, alguns pontos podem ser apresentados em relação as ferramentas LG0.25, SG0.25 e RC0.25, com o comparativo a ferramenta convencional. Em primeiro lugar, a espessura de corte de 0,05 mm reduziu a espessura do cavaco para as ferramentas LG0.25 e SG0.25, sendo influenciadas pela redução do comprimento de contato, semelhante a ferramenta de contato restrito. Em segundo lugar, é observado que a espessura de corte de 0,10 mm é um ponto de transição, ponto esse já apresentado na Tabela 11 como ponto de corte derivativo. A ferramenta LG0.25, apesar de apresentar corte derivativo, ainda foi capaz de reduzir o contato do cavaco e gerar um menor grau de recalque. A ferramenta SG0.25, por sua vez, devido a menor largura da microrranhura, não pode proporcionar redução da área de contato semelhante a ferramenta LG0.25, de modo que o grau de recalque do cavaco para a espessura de corte de 0,10 mm viesse a aumentar.

Com essa observação e retomando os dados apresentados na seção que tratou sobre o comprimento de contato, a presença das microrranhuras, na grande parte das aplicações, tendeu a aumentar o grau de recalque, o qual está tradicionalmente ligado ao comprimento de contato cavaco-ferramenta.

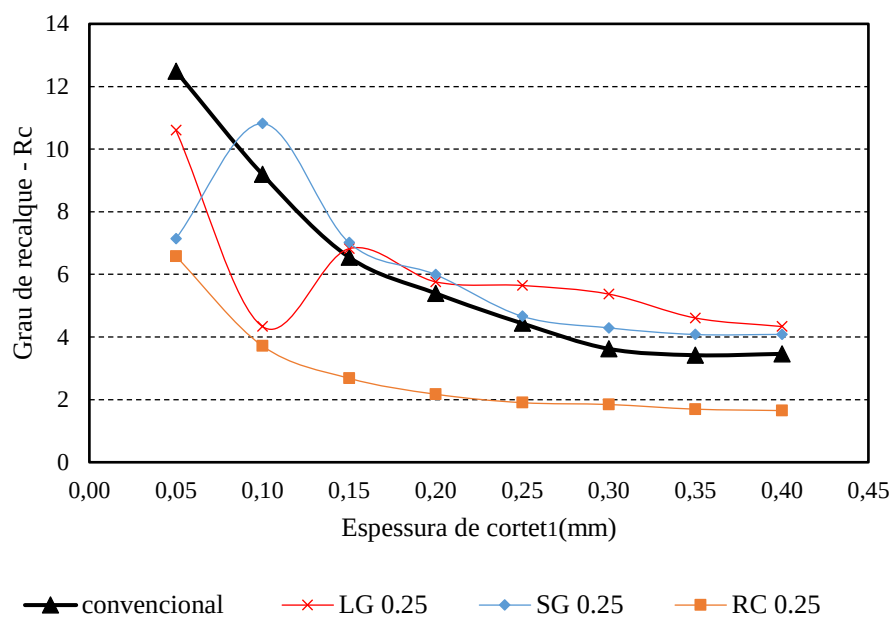


Figura 130: Grau de recalque (Rc) dos cavacos formados em ferramentas LG0.25, SG0.25 e RC0.25 e ferramenta convencional.

Retomando a Tabela 11 e tomando como referência a distância de 0,50 mm da aresta de corte, compreendendo as ferramentas LG0.50, SG0.50 e RC0.50, também é possível identificar as alterações no grau de recalque, indicados na Figura 131. O grau de recalque obtido pela ferramenta RC0.50 apresentou constante redução se comparado a ferramenta convencional, todavia sendo superior aos valores obtidos com a ferramenta RC0.25 apresentado na Figura anterior, corroborando que o aumento progressivo da área de contato influi para o maior encruamento do cavaco. Neste quesito, a ferramenta LG0.50 foi capaz de reduzir o grau de recalque em comparação a convencional em uma espessura de corte até 0,10 mm, visto que a partir da espessura de corte de 0,15 mm ocorre inversão na curva de grau de recalque. Já a ferramenta SG0.50, desde a espessura de corte de 0,05 até 0,40 mm apresentou maiores valores de grau de recalque, fato esse devido a presença de corte derivativo desde o primeiro passe.

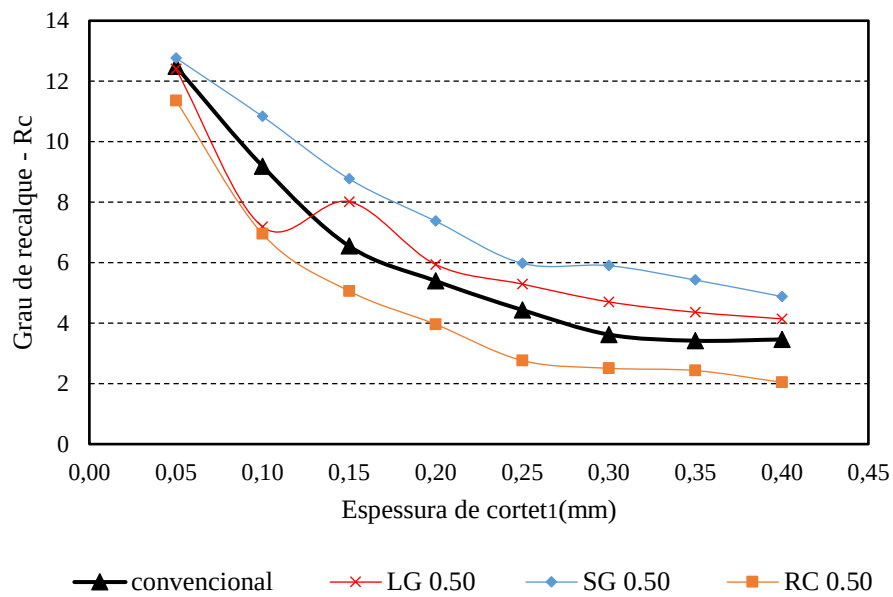


Figura 131: Grau de recalque (Rc) dos cavacos formados em ferramentas LG0.50, SG0.50 e RC0.50 e ferramenta convencional.

Micrografias da seção transversal de amostra obtidas com QSD estão representadas na Figura 132. De maneira semelhante a Figura 129, o montante de material que penetrou a microrranhura de 0,35 mm de largura, contida na ferramenta LG0.50, é superior a quantidade observada para a ferramenta SG0.50 com microrranhura de 0,15 mm de largura. Entretanto, como recordado nas observações da superfície de saída da ferramenta de corte, parte do cavaco pode ter ficado aderido dentro da microrranhura. Por fim, para a dada velocidade de avanço, o cavaco obtido com a ferramenta de contato restrito RC0.50 indica que o ângulo de trajetória é presente, o que pode auxiliar na formação do corte derivativo do tipo induzido.

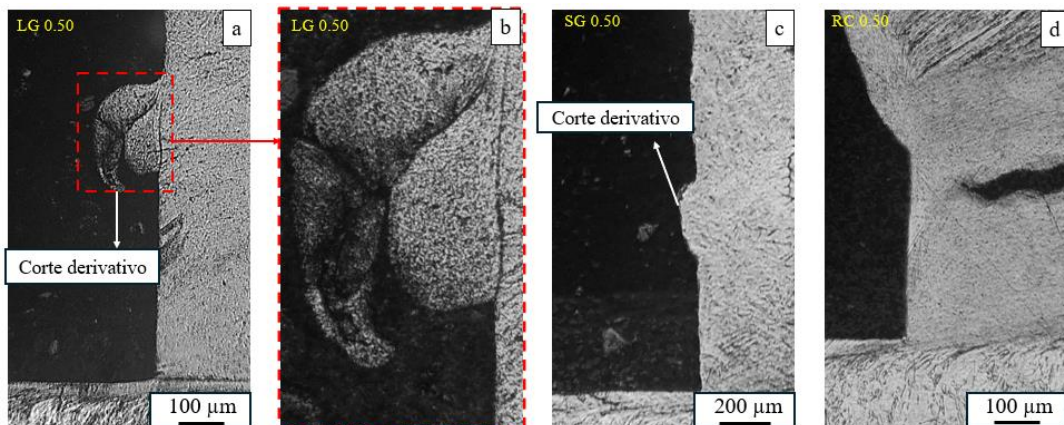


Figura 132: Micrografias dos cavacos em QSD: (a) ferramenta LG0.50; (b) detalhe do cavaco secundário; (c) ferramenta SG0.50; (d) ferramenta RC0.50.

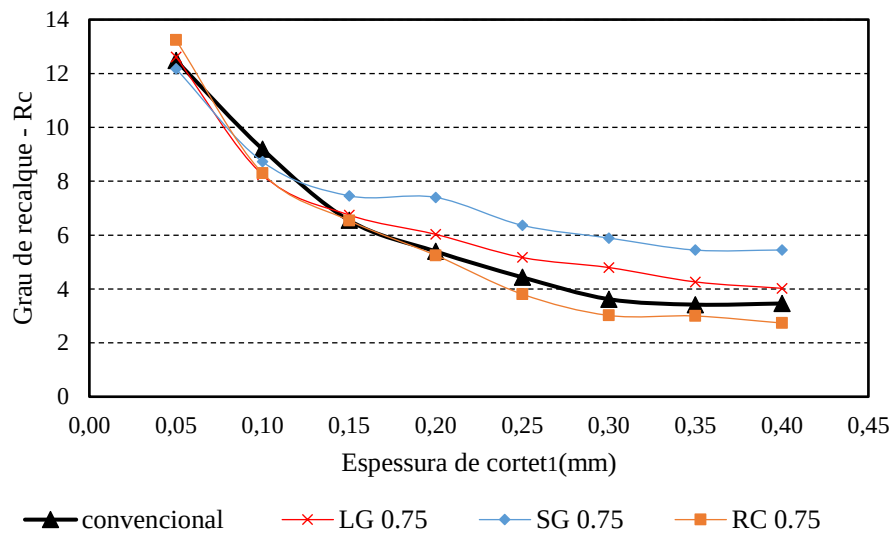


Figura 133: Grau de recalque (Rc) dos cavacos formados em ferramentas LG0.75, SG0.75 e RC0.75 e ferramenta convencional.

Com a distância de 0,75 mm da aresta de corte, a ferramenta de contato restrito RC0.75 começa a ter um comportamento semelhante a ferramenta convencional, do ponto de vista do grau de recalque (Figura 134), indicando a tendência ao corte natural. Com esse distanciamento, as ferramentas com microrranhura LG0.75 e SG0.75 também mostram pouca ou quase nenhuma redução do grau de recalque. A ferramenta LG0.75 segue a curva do grau de recalque da ferramenta RC0.75, destoando dela a partir da espessura de corte de 0,15 mm. A ferramenta SG0.75, por sua vez, apresenta aumento do grau de recalque a partir de 0,15 mm de espessura de corte, e a partir desse ponto mantém-se com grau de recalque acima da ferramenta convencional. Isto posto, é observado que as ferramentas com comprimentos de contato de 0,75 mm são o limiar para o corte restrito e natural, do ponto de vista do grau de recalque, sendo essa determinação reforçada pelos valores do grau de recalque obtidos com as ferramentas RC1.00, RC1.25 e RC1.50 mostrados na Figura 134. Por fim, as micrografias da seção transversal do cavaco são apresentadas na Figura 135, sendo possível observar que ainda é possível determinar a presença de corte derivativo, em menor volume.

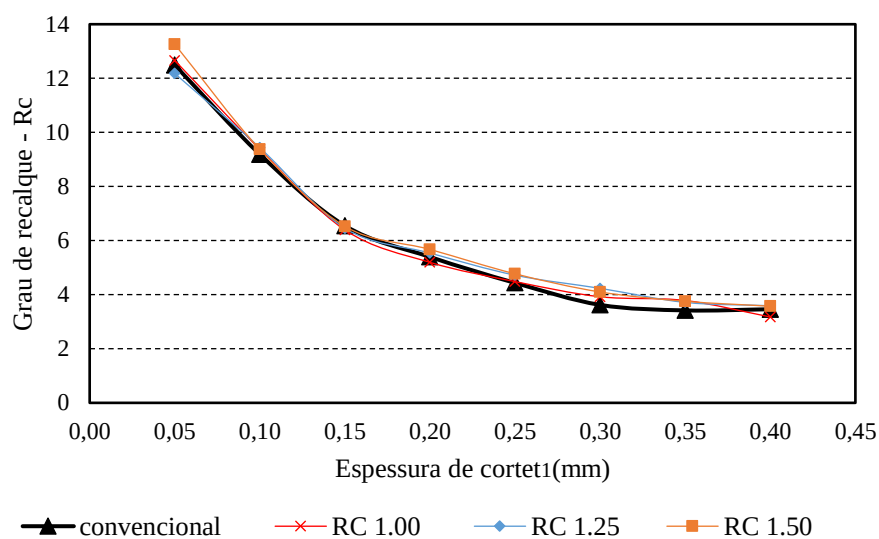


Figura 134: Grau de recalque (Rc) dos cavacos formados em ferramentas LG1.00, SG1.00 e RC1.00 e ferramenta convencional.

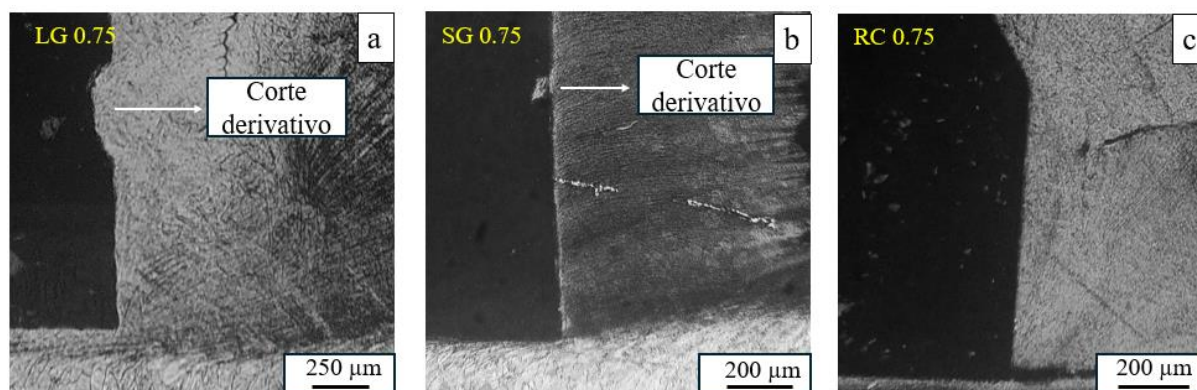


Figura 135: Micrografias dos cavacos na (a) ferramenta LG0.75; (b) SG0.75; e (c) RC0.75.

4.4 FORÇAS DE CORTE

Em seções anteriores, foram apresentados resultados que indicaram a presença do corte derivativo, podendo este ser classificado como corte derivativo devido a corte pela aresta da microrranhura, bem como outra classificação denominada como corte derivativo induzido, situação pelo qual o ângulo de trajetória do cavaco, relacionado a ferramentas de contato restrito, direciona o cavaco para dentro da microrranhura, ocasionando um entupimento prematuro da região texturizada. Não obstante, a relação entre comprimento de contato e

ferramentas com microrranhura foi apresentada, de modo a expor que as regiões de contato são alteradas com a presença de microrranhuras, nem sempre de maneira positiva. Isto posto, esta seção final apresentará os dados relativos as forças de corte e suas relações com os fenômenos apresentados.

4.4.1 Forças de corte em ferramentas de corte restrito

A restrição forçada do comprimento de contato entre cavaco e ferramenta de corte, realizado pela supressão da superfície de saída da ferramenta de corte foi capaz de reduzir as forças de corte, se comparadas a ferramenta convencional. As forças de corte resultantes obtidas com as ferramentas de contato restrito em função da variação das profundidades de corte estão apresentadas na Figura 136. Em detalhe, a representação dos valores de l/t_1 obtidos na última espessura de corte mostram elevação em seus valores em função do aumento do comprimento de contato da superfície de saída. Em termos de força normal a superfície de saída (Figura 137) e força tangencial à superfície de saída (Figura 138), há semelhança no comportamento geral das forças, mostrando maiores inclinações para as ferramentas com maior comprimento de contato, até o ponto em que a ferramenta de corte RC1.50 iguala-se a ferramenta de corte convencional.

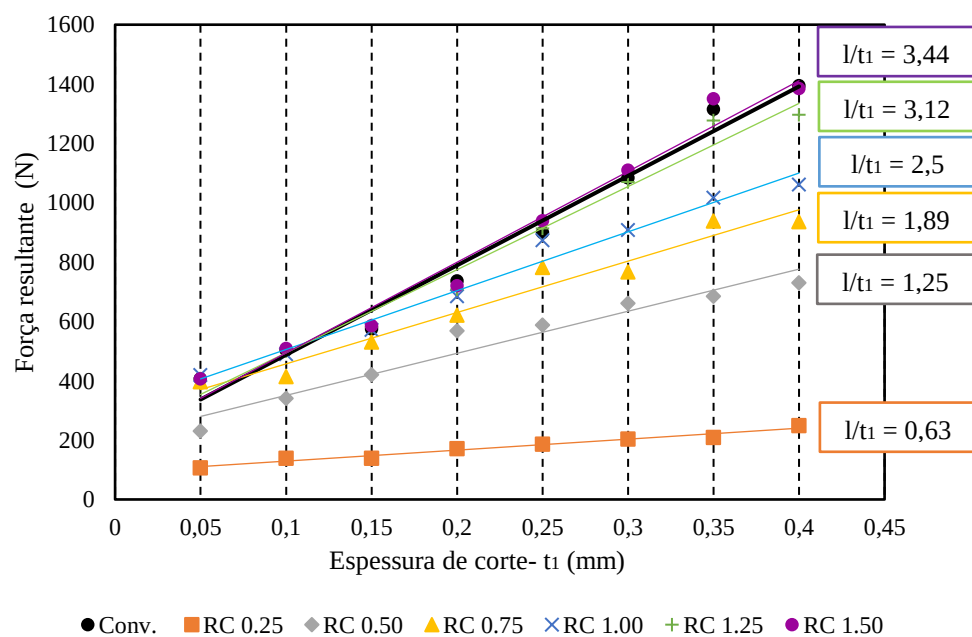


Figura 136: Força resultante obtidas com ferramentas de contato restrito.

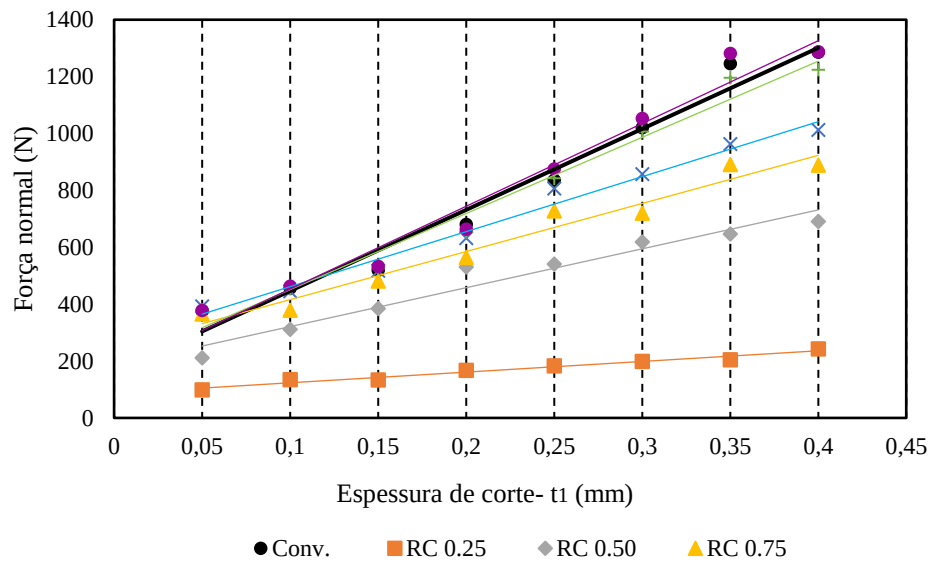


Figura 137: Força de corte normal à superfície de saída obtidas com ferramentas de contato restrito.

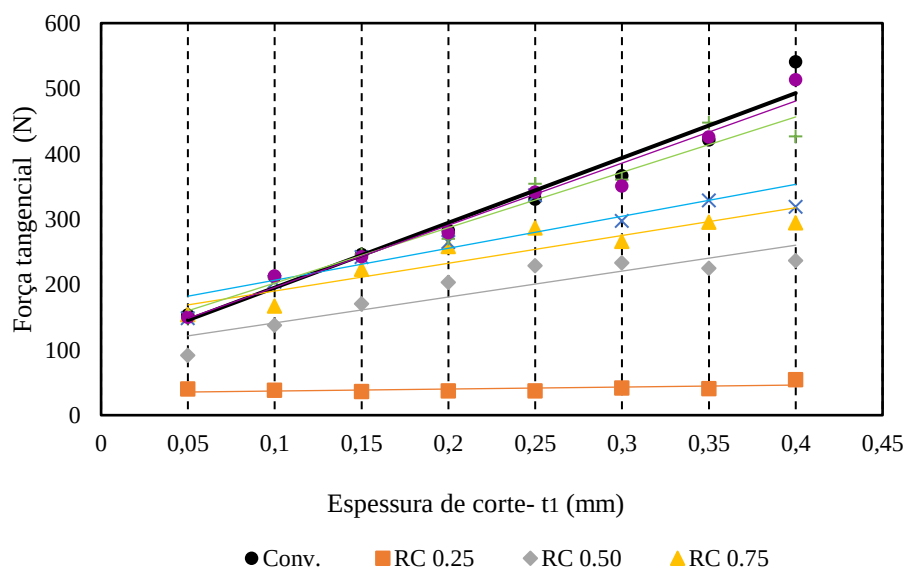


Figura 138: Força de corte tangencial à superfície de saída obtidas com ferramentas de contato restrito.

A tendência de aumento das forças de corte como mostrado por Wallace e Boothroyd (1964) e Hsu (1966) e apresentadas da revisão da literatura na Figura 2, assemelham-se com os dados apresentados nas Figuras citadas a pouco. De mesma forma, o aumento da relação l/t_1 é tido em função da maior inclinação dos valores de tendência das forças de usinagem. No

entanto, a plotagem das forças de corte em função de uma mesma ferramenta de corte não mostra claramente o ponto em que o comprimento de contato é atingido. Para tanto, manter a espessura de corte e avaliar o aumento do comprimento de contato pode apresentar novas evidências, como observado na Figura 139.

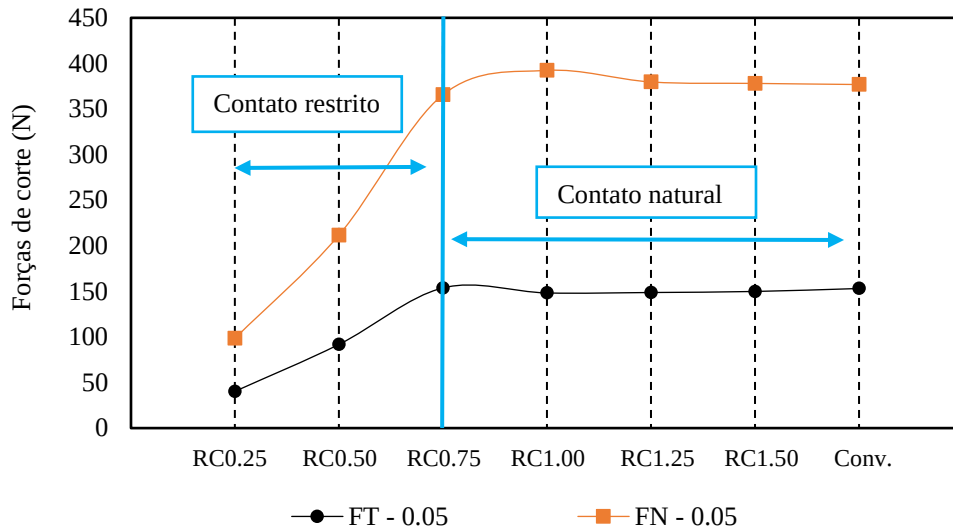


Figura 139: Força normal e tangencial em função do aumento do comprimento de contato, com espessura de corte de 0,05 mm.

Em vistas a facilitar a observação geral dos dados acerca de forças e relações de contato, a Tabela 17 apresenta uma compilação de tais valores. As relações t_1/l e l/t_1 obtidas nos pontos de transição apresentados na Figura 139 são respectivamente 0,2 e 5, enquanto a razão de contato apresentada é 1. As forças normais e tangenciais obtidas durante os ensaios com ferramentas de contato restrito são apresentados na Figura 140 e Figura 141. É possível verificar que, a partir de um determinado comprimento de contato, existe a tendência de estabilização das forças, até na iminência da ferramenta RC1.50 com a ferramenta convencional, há pouca variação nas forças de corte.

Verificando tais apontamentos em função dos dados apresentados na Tabela 17, é possível identificar que os pontos de estabilização das forças de corte são coincidentes ou próximos a razão de contato equivalente a 1.

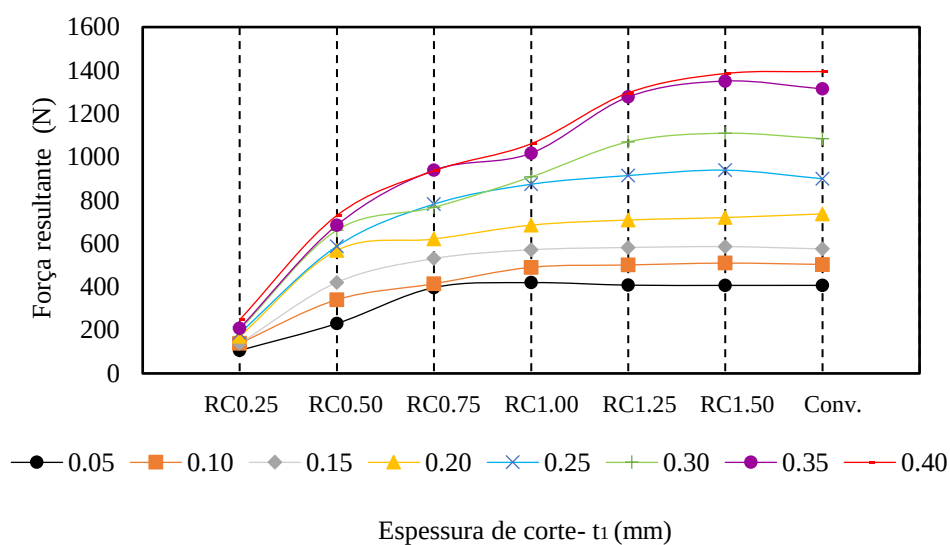


Figura 140: Força normal em função da espessura de corte em ferramentas de contato restrito.

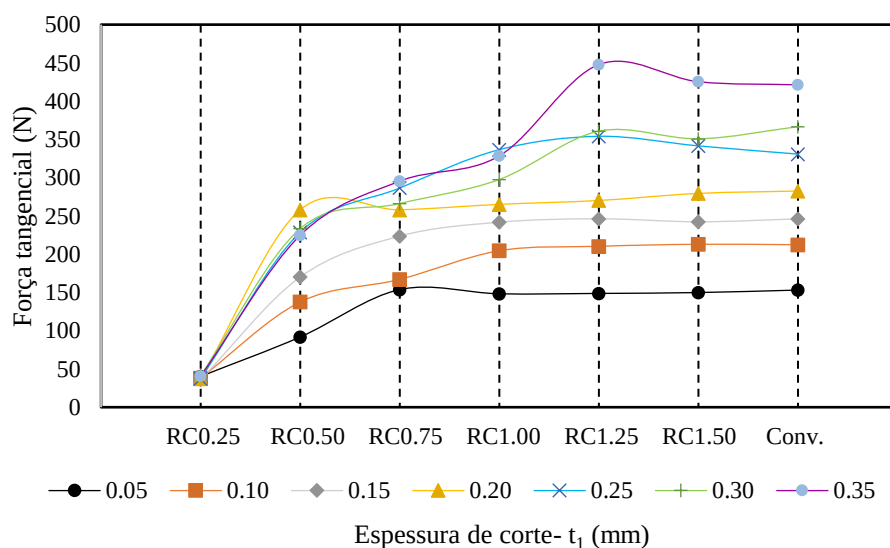


Figura 141: Força tangencial em função da espessura de corte em ferramentas de contato restrito.

Lo et al. (1966), mostraram o ponto de estabilização das forças de corte em função do comprimento de contato, no caso $t_1/l = 0,6$. Em relação aos dados obtidos, os pontos de estabilização das forças nas profundidades de corte de 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40 mm, apresentados na relação t_1/l são: 0,09; 0,15; 0,20; 0,27; 0,24; 0,27; 0,28 e 0,29, respectivamente. Analisando a razão de contato apresentado na Tabela 17, junto aos dados da Figura 140 e Figura 141, pode ser observado que para a espessura de corte de 0,05 mm, as forças tenderam a se estabilizar a partir da ferramenta RC0.75, na qual a razão de contato já havia

atingido 1 na ferramenta RC0.50. Para a espessura de corte de 0,10 mm, a partir da ferramenta de corte RC1.00 houve maior tendência a estabilização das forças, que já na ferramenta RC0.75 ocorreu o valor de 1 para a razão de contato. Em sequência, na espessura de corte de 0,15 mm, a razão de contato 1 foi atingida com a ferramenta RC1.00, mas, um pouco antes já ocorria a tendência de estabilização, com a ferramenta RC0.75, sendo a mesma situação ocorrida com a espessura de corte de 0,20 mm. Ainda, as profundidades de corte de 0,25 a 0,35 mm atingiram a razão de contato de 1 e a maior tendência de estabilização das forças. Por fim, para a espessura de corte de 0,40 mm, a razão de contato 1 é obtida com a ferramenta RC1.25, juntamente a tendência de estabilização das forças.

Dessa forma, a relação entre comprimento de contato total e comprimento de contato efetivo pode ser mais palpável, principalmente para a comparação com ferramentas de corte microrranhuradas, nas quais a relação de contato juntamente a presença do corte derivativo ainda não é bem compreendida.

Tabela 17: Força resultante, relação (t_1/l) e (l/t_1), razão de contato e coeficiente de atrito obtidas com as ferramentas de contato restrito

Força resultante (N)	Espessura de corte – t_1 (mm)							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Conv.	406,74	466,16	543,82	737,00	899,31	1084,53	1314,48	1394,61
RC0.25	106,41	139,53	138,90	171,38	186,76	203,34	209,03	248,79
RC0.50	234,26	340,57	420,52	568,35	587,48	661,65	684,99	729,78
RC0.75	396,61	414,21	491,30	620,87	782,00	767,41	938,83	936,16
RC1.00	419,39	453,69	494,42	685,08	873,91	907,79	1017,35	1061,08
RC1.25	407,74	463,79	503,41	708,61	913,93	1069,64	1277,23	1296,17
RC1.50	406,68	471,73	517,54	720,11	939,06	1109,60	1350,63	1385,41

Coeficiente de atrito	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Conv.	0,41	0,47	0,47	0,42	0,40	0,36	0,34	0,42
RC0.25	0,41	0,28	0,27	0,22	0,20	0,21	0,20	0,22
RC0.50	0,43	0,44	0,44	0,38	0,42	0,38	0,35	0,34
RC0.75	0,42	0,44	0,46	0,46	0,39	0,37	0,33	0,33
RC1.00	0,38	0,46	0,47	0,42	0,42	0,35	0,34	0,32
RC1.25	0,39	0,46	0,47	0,41	0,42	0,36	0,37	0,35
RC1.50	0,40	0,46	0,45	0,42	0,39	0,33	0,33	0,40

Relação t_1/l	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Conv.	0,09	0,15	0,17	0,2	0,24	0,27	0,28	0,29
RC0.25	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
RC0.50	0,09	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
RC0.75	0,09	0,15	0,2	0,27	0,33	0,4	0,47	0,53
RC1.00	0,09	0,15	0,17	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
RC1.25	0,09	0,15	0,17	0,2	0,24	0,27	0,28	0,32
RC1.50	0,09	0,15	0,17	0,2	0,24	0,27	0,28	0,29

Relação l/t_1	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Conv.	11,11	6,67	5,88	5,00	4,17	3,70	3,57	3,45
RC0.25	5,00	2,50	1,67	1,25	1,00	0,83	0,71	0,63
RC0.50	11,11	5,00	3,33	2,50	2,00	1,67	1,43	1,25
RC0.75	11,11	6,67	5,00	3,70	3,03	2,50	2,13	1,89
RC1.00	11,11	6,67	5,88	5,00	4,00	3,33	2,86	2,50
RC1.25	11,11	6,67	5,88	5,00	4,17	3,70	3,57	3,13
RC1.50	11,11	6,67	5,88	5,00	4,17	3,70	3,57	3,45

razão de contato	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Conv.	1	1	1	1	1	1	1	1
RC0.25	0,45	0,37	0,28	0,25	0,24	0,22	0,2	0,18
RC0.50	1	0,75	0,57	0,5	0,48	0,45	0,4	0,37
RC0.75	1	1	0,85	0,75	0,71	0,67	0,6	0,55
RC1.00	1	1	1	1	0,95	0,89	0,8	0,74
RC1.25	1	1	1	1	1	1	1	0,92
RC1.50	1	1	1	1	1	1	1	1

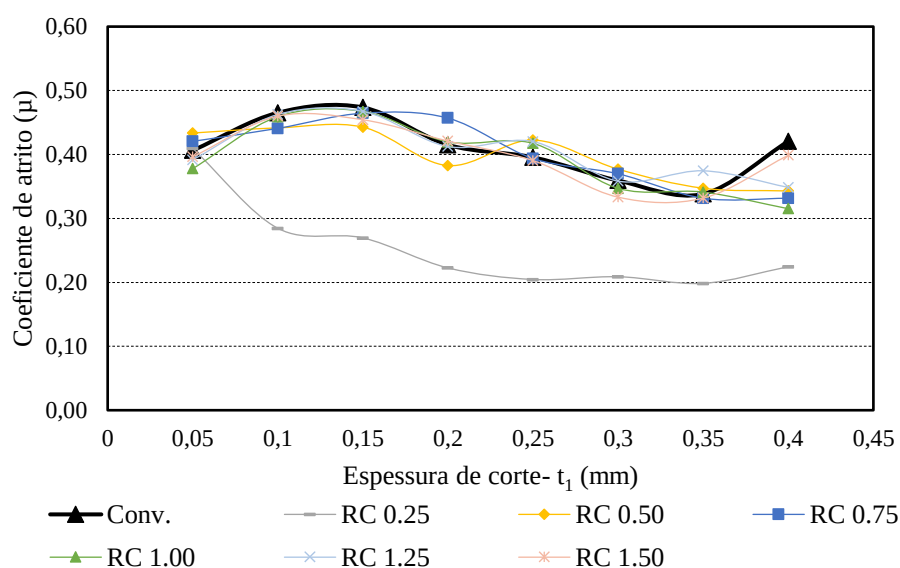


Figura 142: Coeficiente de atrito na usinagem com ferramentas de contato restrito

Em relação ao coeficiente de atrito obtido com as ferramentas de contato restrito, apresentado na Figura 142, é verificável que uma redução significativa ocorreu com a ferramenta de contato restrito RC0.25, na qual a razão de contato variou entre 0,18 até 0,45 dentre as condições de usinagem avaliadas. Para tanto, na presença da menor razão de contato, o coeficiente de atrito atingiu um valor médio de 0,22, colocando-se em torno de 46,7% abaixo do valor obtido com a ferramenta de corte convencional. No entanto, os dados mostram que uma concordância com as demais ferramentas com contato restrito foi obtida, em termos de coeficiente de atrito. Ao representado, apenas reduções abruptas na superfície de saída poderiam conceder reduções expressivas no atrito na interface de corte. De antemão, adianta-se que a discussão sobre o atrito nas ferramentas de corte com microrranhura não será apresentada, haja vista que a relação entre força normal e tangencial neste caso está condicionada a relação do corte derivativo, estendendo-se a futuros trabalhos.

4.4.2 Forças de corte em ferramentas texturizadas

Tomando como referência a distância de 0,25 mm da aresta de corte, as ferramentas LG0.25, SG0.25 e RC0.25 são analisadas inicialmente, juntamente aos dados de força resultante verificados com as ferramentas de corte convencional.

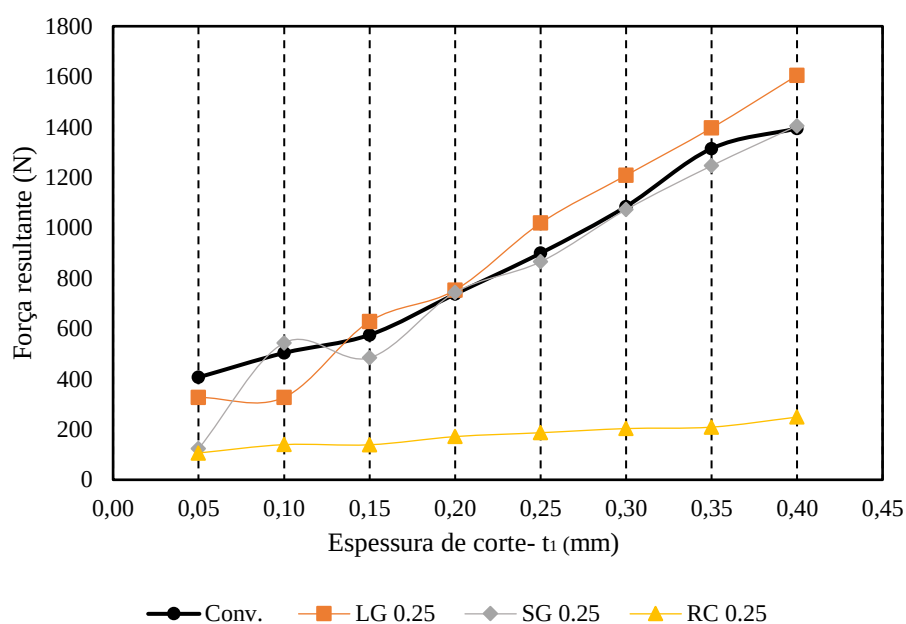


Figura 143: Força resultante obtida com as ferramentas de corte LG0.25, SG0.25, RC0.25 e convencional.

É possível verificar na Figura 143 o comportamento das forças de corte resultantes em função do aumento da espessura de corte. Interessante notar que, em baixas profundidades de corte, as ferramentas de corte com microrranhura apresentaram tendência de redução de esforços. A ferramenta de corte LG0.25 e SG0.25, que apresentaram razão de contato de 0,45 e 0,95, respectivamente, foram verificadas reduções nas forças na ordem de 19,5 e 69,7 %. Juntamente a isso, o grau de recalque, apresentado na Figura 130, também evidencia valores menores comparados a condição convencional. A partir da espessura de corte de 0,10 mm, a ferramenta SG0.25 passa a gerar valores de força de corte superior a ferramenta de corte tradicional, tendo em vista que sua razão de contato neste ponto passa ser de 1,3, enquanto a ferramenta LG0.25 apresenta redução nos valores médios de força, apresentando razão de contato de 1,09. De fato, a partir da espessura de corte de 0,15 mm, as ferramentas de corte LG0.25 tendem a apresentar forças superiores a ferramenta convencional, enquanto a ferramenta SG0.25 apresenta ligeira ou redução ou praticamente a mesma tendência da ferramenta convencional.

É de se ressaltar que a redução de comprimento de contato tradicionalmente citada como benefício das ferramentas de corte texturizadas pode nem sempre ser observado na aplicação de microrranhuras. Porém, se comparadas a ferramentas de contato restrito, a redução de forças é diretamente ligada a este parâmetro, sendo influenciada pela presença do corte derivativo.

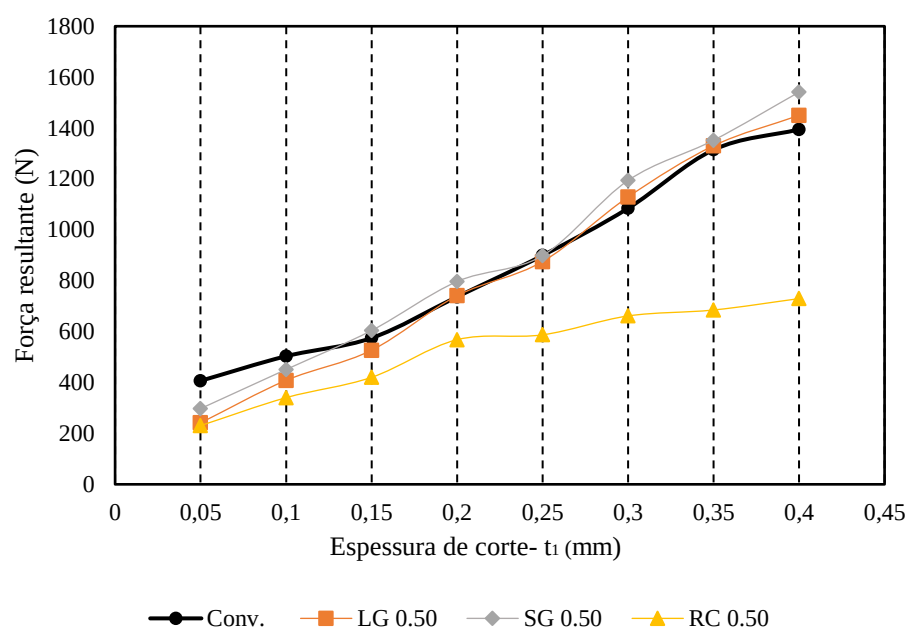


Figura 144: Forças de corte resultantes obtidas com as ferramentas de corte LG0.50, SG0.50, RC0.50 e convencional.

Tomando como referência a distância de 0,50 mm da aresta de corte, as ferramentas LG0.50, SG0.50 e RC0.50 são analisadas. É possível verificar pela Figura 144, que a distância entre as forças obtidas com as ferramentas LG0.50 e SG0.50 começa a ser menor para as forças obtidas com a ferramenta RC0.50. A dada ferramenta de contato restrito apresentou razão de contato com valores de 1 a 0,37 em função do aumento da espessura de corte, evidenciando a sua redução de contato. As ferramentas de corte LG0.50 e SG0.50, apesar de atingirem razão de contato de 0,95 até 1,31, ainda foram pertinentes na redução das forças de corte, obtendo valores acima dos obtidos com as ferramentas de contato restrito. Em função do aumento da espessura de corte, iniciando em 0,15 mm, as ferramentas de corte com microrranhura tendem a apresentar forças de corte de maneira semelhante a ferramenta convencional. As mudanças nas regiões de contato entre cavaco e ferramenta devido a presença do corte derivativo, foram influentes nas alterações de forças de corte, como será discutido isoladamente para cada espessura de corte em relação a distância das microrranhuras a aresta de corte.

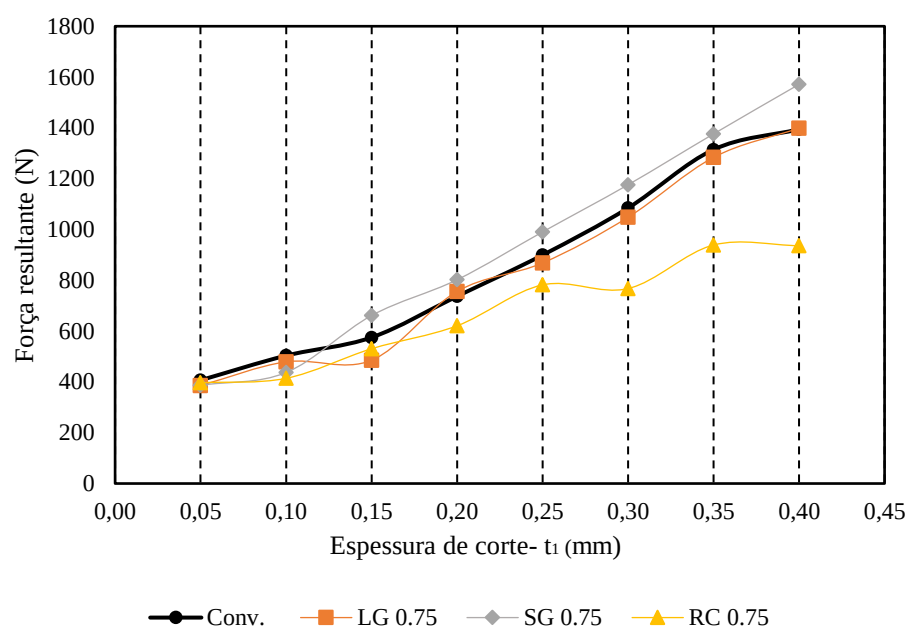


Figura 145: Força resultante obtida com ferramentas de corte LG0.75, SG0.75, RC0.75 e convencional.

Observando os dados apresentados na Figura 145, que apresenta dos dados de forças para as ferramentas de corte LG0.75, SG0.75 e RC0.75, com distância de 0,75 mm da aresta de corte, fica evidente que a esta distância as microrranhuras tem pouca ou nenhuma variação em função do aumento da espessura de corte. No entanto, a ferramenta de corte RC0.75 ainda apresenta redução de forças consideráveis a partir da espessura de corte de 0,30 mm. Com isso, o posicionamento de microrranhuras que pudessem efetivamente reduzir o comprimento de contato ainda seria viável nesta região, possibilitando assim o desenvolvimento de ferramentas de corte para desbaste ou condições de usinagem mais severas, visto que nesta posição as microrranhuras ainda estão nas regiões de contato, como evidenciado anteriormente.

Ainda como ponto de debate frente ao projeto de ferramenta de corte texturizadas, mais especificamente no caso de aplicação de microrranhuras em ferramentas de corte, ainda são discutíveis dois pontos, que são seu posicionamento em relação a aresta de corte e a dimensão da microrranhura. Dito isto, a discussão a seguir será realizada fixando-se a espessura de corte e comparando as larguras e posições das microrranhuras.

Iniciando a discussão, a Figura 146 apresenta as forças normais e tangenciais, obtidas com as ferramentas com microrranhuras em diferentes posições. Juntamente, são apresentados na Tabela 18, as características frente ao processo de usinagem na referida espessura de corte. A ferramenta de corte com microrranhura de 0,15 mm de largura permitiu redução expressiva

nas forças de corte, principalmente quando a microrranhura estava posicionada mais próximo da aresta de corte. Para a posição de 0,25 mm da microrranhura, foram obtidas reduções de esforços na ordem de 73,4 e 52,9% nas forças normal e tangencial, respectivamente. Em seguida, com a microrranhura posicionada a 0,50 mm da aresta de corte, a força normal foi reduzida em 30,4% e a força tangencial em 8,2%. À medida que a microrranhura foi posicionada a maior distância, em 0,75 mm da aresta de corte, ficando fora da região de contato, a ferramenta comportou-se como a ferramenta convencional, apresentando esforços semelhantes a ferramenta convencional.

As ferramentas com microrranhuras de 0,35 mm também reduziram as forças frente a ferramenta de corte convencional na espessura de corte de 0,05 m, principalmente em 22,6% em relação a força normal, enquanto a força tangencial não apresentou melhora expressiva. No entanto, com a microrranhura posicionada a 0,50 mm da aresta de corte, reduções de 42,7 e 29,2% nas forças normais e tangenciais, nesta ordem, foram observadas. Por fim, a presença da microrranhura à 0,75 mm de distância da aresta de corte não trouxe benefícios nesta aplicação.

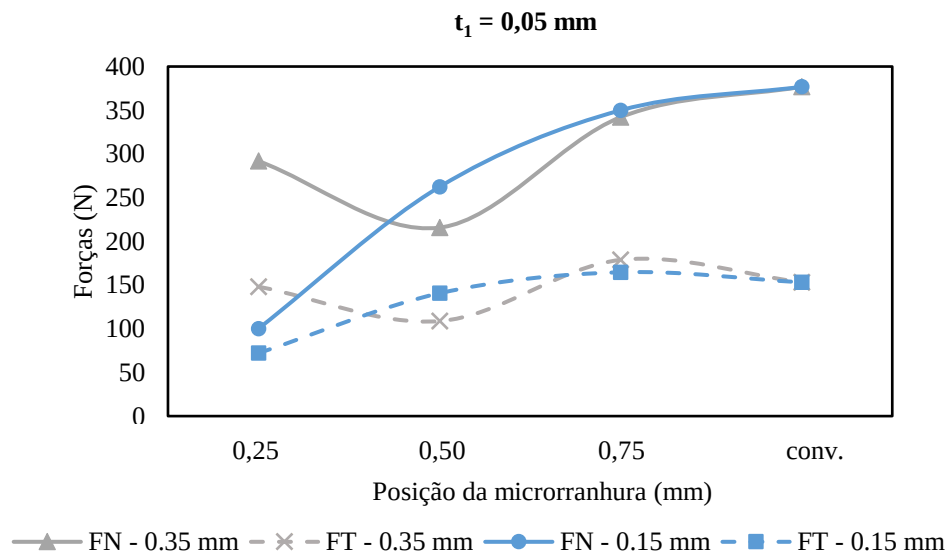


Figura 146: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,05 mm de espessura de corte .

Tabela 18: Dados relativos à espessura de corte de 0,05 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura a da aresta, l_1 (mm)	Largura da microrranhura, l_2 (mm)	Razão de contato, r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente, η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte, l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	0,45	23	5	63,64%
SG0.25	0,25	0,15	0,95	23	5	27,27%
LG0.50	0,50	0,35	1,27	0	10	63,64%
SG0.50	0,50	0,15	0,80	0	10	27,27%
LG0.75	0,75	0,35	1,22	0	14,3	63,64%
SG0.75	0,75	0,15	0,81	0	14,3	27,27%

* comprimento de contato da condição convencional = 0,55 mm

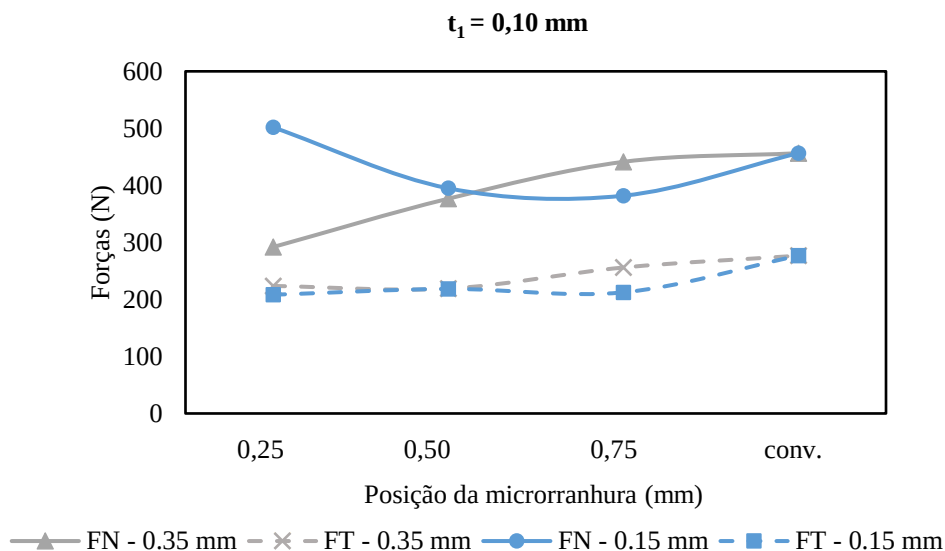


Figura 147: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,10 mm de espessura de corte .

Considerando os dados apresentados na Figura 147, a distância e largura das microrranhuras foram avaliadas em relação a alterações na força de corte durante a usinagem com espessura de corte de 0,10 mm. Em complemento, os dados relativos as condições de usinagem são apresentadas na Tabela 19. É possível inferir o comportamento de aumento gradativo de forças em função do distanciamento da aresta de corte da microrranhura de 0,35 mm de largura. Para esta microrranhura, as forças normais foram reduzidas na ordem de 36,5; 17,5; e 3,3 %, enquanto as forças tangenciais apresentaram reduções de 19,2; 20,9 e 7,5% nas

posições de 0,25; 0,50 e 0,75 mm, respetivamente. Ambigualmente, as ferramentas com microrranhura de 0,15 mm de largura não apresentaram redução de forças quando a microrranhura foi posicionada próximo a aresta de corte, apresentando aumento de quase 10% em relação a força normal, se comparado a ferramenta convencional, porém uma redução de 24,8 % na força tangencial.

Tabela 19: Dados relativos à espessura de corte de 0,10 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura da aresta, l_1 (mm)	Largura da microrranhura, l_2 (mm)	Razão de contato, r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente, η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte, l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	1,09	28	2,5	52,24%
SG0.25	0,25	0,15	1,31	28	2,5	22,39%
LG0.50	0,50	0,35	1,28	20	5	52,24%
SG0.50	0,50	0,15	1,40	20	5	22,39%
LG0.75	0,75	0,35	1,54	0	7,7	52,24%
SG0.75	0,75	0,15	1,49	0	7,7	22,39%

* comprimento de contato da condição convencional = 0,67 mm

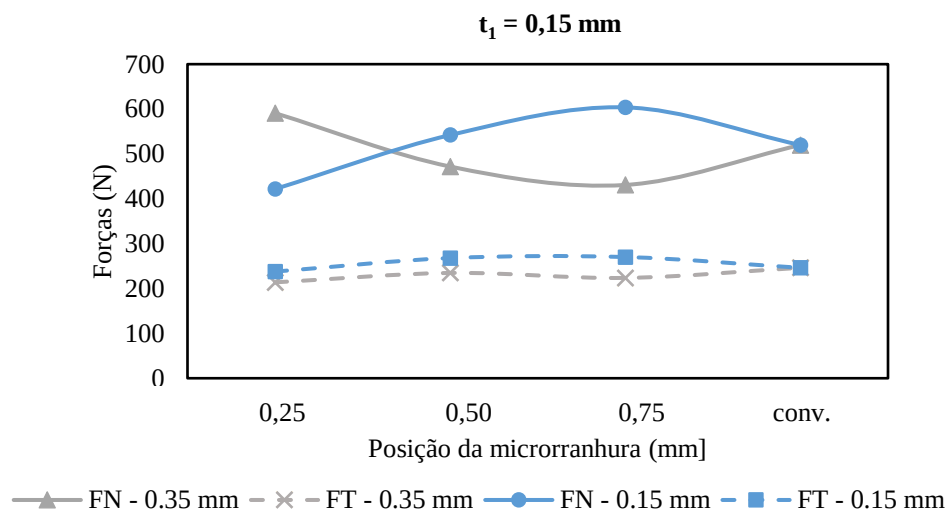


Figura 148: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,15 mm de espessura de corte .

Durante os ensaios utilizando a espessura de corte de 0,15 mm, foram obtidos os valores de forças normais e tangenciais apresentados na Figura 148, juntamente aos dados apresentados na Tabela 20. As forças tangenciais apresentas para ambas as dimensões de microrranhuras

apresentaram menor variabilidade em função das variações de posição das microrranhuras, com variações entre reduções de 13% até aumentos de 9,7%, com destaque as reduções para as ferramentas com microrranhuras de 0,35 mm. Quanto a força normal, as microrranhuras de 0,15 mm de largura posicionadas mais próximas a aresta de corte apresentaram reduções de 18,9%, mas, aumentado seu distanciamento a aresta de corte, houve tendência de aumento de 4,3% e 16,1% nas forças normais para as distâncias de 0,50 e 0,75 mm da aresta de corte, respectivamente, mostrando nesse ponto ações prejudiciais frente a aplicação de ferramentas com microrranhuras. De modo interessante, as microrranhuras de 0,35 mm de largura aumentaram as forças normais na posição mais próxima a aresta de corte em valores de 13,7% e apresentaram tendência a redução destas forças entre 9,2 e 17,1 % durante o posicionamento em 0,50 e 0,75 mm distantes à aresta de corte.

Tabela 20: Dados relativos à espessura de corte de 0,15 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura da aresta, l_1 (mm)	Largura da microrranhura, l_2 (mm)	Razão de contato, r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente, η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte, l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	0,86	31	1,67	39,77%
SG0.25	0,25	0,15	1,09	31	1,67	17,05%
LG0.50	0,50	0,35	1,06	27	3,3	39,77%
SG0.50	0,50	0,15	1,18	27	3,3	17,05%
LG0.75	0,75	0,35	1,20	20	5	39,77%
SG0.75	0,75	0,15	1,21	20	5	17,05%

* comprimento de contato da condição convencional = 0,88 mm

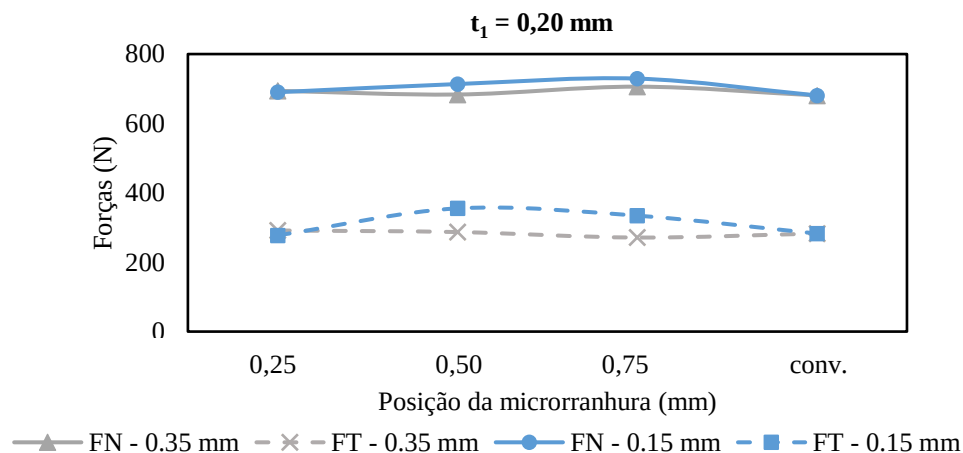


Figura 149: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,20 mm de espessura de corte .

As forças obtidas durante a usinagem em 0,20 mm são apresentadas na Figura 149, bem como os dados relativos as condições de usinagem na Tabela 21. A espessura de corte de 0,20 mm apresentou-se como um limiar para as reduções significativas para a aplicação das microrranhuras. As forças normais, apresentaram pequenas variações desde a redução de 1,4 % até o aumento de 7,1% (microrranhura de 0,15 mm a 0,75 mm da aresta de corte - SG0.75) sugerindo nenhuma melhora ou até piora nesta região. A força tangencial também foi caracterizada por não apresentar melhorias expressivas e até mesmo piora. Os aumentos de força tangencial mais expressivos foram de 25,7 e 18,2 %, com a aplicação de microrranhuras de 0,15 mm de largura em 0,50 e 0,75 mm relativos à aresta de corte, respectivamente (ferramentas SG0.50 e SG0.75).

Tabela 21: Dados relativos à espessura de corte de 0,20 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura da aresta, l_1 (mm)	Largura da microrranhura, l_2 (mm)	Razão de contato, r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente, η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte, l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	0,94	35	1,25	35%
SG0.25	0,25	0,15	0,97	35	1,25	15%
LG0.50	0,50	0,35	0,97	28	2,5	35%
SG0.50	0,50	0,15	1,33	28	2,5	15%
LG0.75	0,75	0,35	1,15	23	3,7	35%
SG0.75	0,75	0,15	1,12	23	3,7	15%

* comprimento de contato da condição convencional = 1 mm

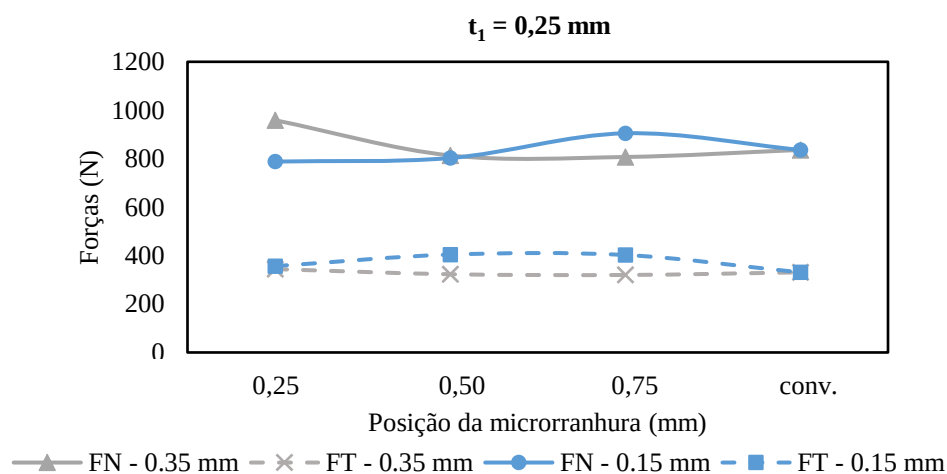


Figura 150: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,25 mm de espessura de corte .

Analogamente a espessura de corte de 0,20 mm, a espessura de corte de 0,25 mm mostra que a aplicação de microrranhuras não trouxe benefícios ou até mesmo gerou aumento de forças em relação a variação do posicionamento deles, conforme os dados apresentados na Figura 150, tendo em vista que os dados para tal espessura de corte estão apresentados na Tabela 22. Os piores valores obtidos em relação a força normal foram observados com a microrranhura de 0,35 mm de largura posicionada à 0,25 mm da aresta de corte (LG0.25) juntamente a microrranhura de 0,15 mm de largura posicionada a 0,75 mm a aresta de corte (SG0.75), com aumentos respectivos de 14,7 e 8,2%. Em relação a força tangencial, aumentos de 22,2 e 21,7% foram observados com as microrranhuras de 0,15 mm nos posicionamentos de 0,50 e 0,75 mm relativos à aresta de corte (SG0.50 e SG0.75).

Tabela 22: Dados relativos à espessura de corte de 0,25 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura a da aresta, l_1 (mm)	Largura da microrranhura, l_2 (mm)	Razão de contato, r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente, η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte, l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	0,96	38	1	33,33%
SG0.25	0,25	0,15	1,01	38	1	14,29%
LG0.50	0,50	0,35	0,94	31	2	33,33%
SG0.50	0,50	0,15	1,33	31	2	14,29%
LG0.75	0,75	0,35	1,15	21	3	33,33%
SG0.75	0,75	0,15	1,22	21	3	14,29%

* comprimento de contato da condição convencional = 1,05 mm

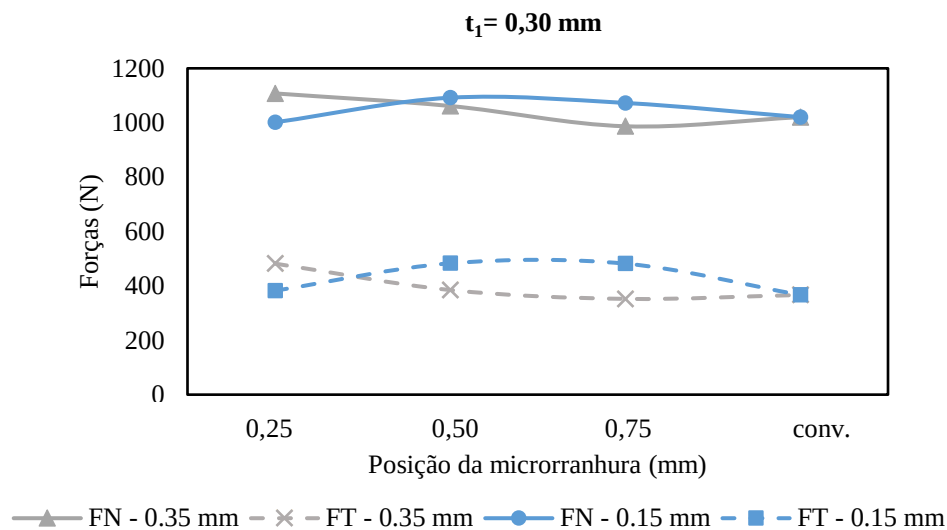


Figura 151: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura a 0,30 mm de espessura de corte .

A uma espessura de corte de 0,30 mm (Tabela 23 e Figura 151), as microrranhuras não foram eficazes em gerar melhorias quanto a redução das forças de corte. É de se expressar que as forças tangenciais têm sido mais influenciadas frente a ineficácia da posição da microrranhura a partir da espessura de corte de 0,20 mm. De acordo com os dados apresentados na Figura 151, a força tangencial teve aumentos próximos a 31% com a microrranhura de 0,35 mm a 0,25 mm da aresta de corte (LG0.25) e com as microrranhura de 0,15 mm a 0,50 e 0,75 mm da aresta de corte (SG0.50 e SG0.75 respectivamente). Ainda nesta espessura de corte , as forças normais variaram com reduções de 3,3 até aumentos de 8,5 % dentre as condições.

Tabela 23: Dados relativos à espessura de corte de 0,30 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura da aresta, l_1 (mm)	Largura da microrranhura, l_2 (mm)	Razão de contato, r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente – η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte, l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	1,07	41	0,83	31,25%
SG0.25	0,25	0,15	1,09	41	0,83	13,39%
LG0.50	0,50	0,35	0,96	33	1,67	31,25%
SG0.50	0,50	0,15	1,31	33	1,67	13,39%
LG0.75	0,75	0,35	1,11	23	2,5	31,25%
SG0.75	0,75	0,15	1,36	23	2,5	13,39%

* comprimento de contato da condição convencional = 1,12 mm

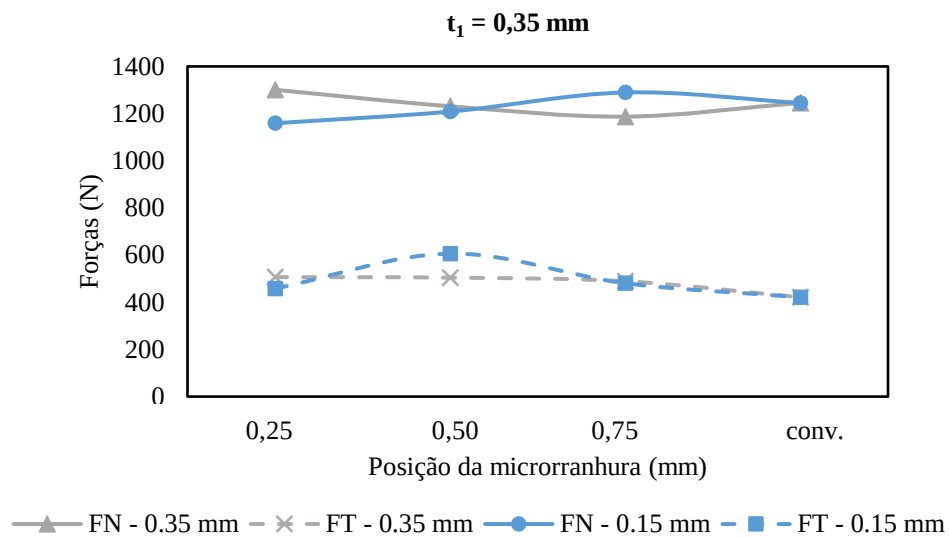


Figura 152: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura à 0,35 mm de espessura de corte .

A Figura 152 apresenta os dados relativos à espessura de corte de 0,35 mm. Para a referida espessura de corte , os dados relativos as condições de usinagem estão contidas na Tabela 24. Assim como visto na espessura de corte de 0,30 mm, as forças tangenciais foram mais afetadas pela presença das microrranhuras, tendo em vista aumentos de 8,7 até 43,9 % são vistos, para os quais o maior aumento é observado com a microrranhura de 0,15 mm de largura a uma posição de 0,5 mm da aresta de corte. Quanto as forças normais, variações com aumentos de 4,5% e reduções de 6,9% são observadas, sendo essa redução atribuída a microrranhura de 0,15 mm posicionada a 0,25 mm da aresta, condição essa que também gerou o menor aumento da força tangencial.

Tabela 24: Dados relativos à espessura de corte de 0,35 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura da aresta – l_1 (mm)	Largura da microrranhura – l_2 (mm)	Razão de contato – r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente – η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte – l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	1,01	43	0,7	28%
SG0.25	0,25	0,15	0,99	43	0,7	12%
LG0.50	0,50	0,35	0,90	32	1,43	28%
SG0.50	0,50	0,15	1,3	32	1,43	12%
LG0.75	0,75	0,35	1,1	33	2,14	28%
SG0.75	0,75	0,15	1,13	33	2,14	12%

* comprimento de contato da condição convencional = 1,25 mm

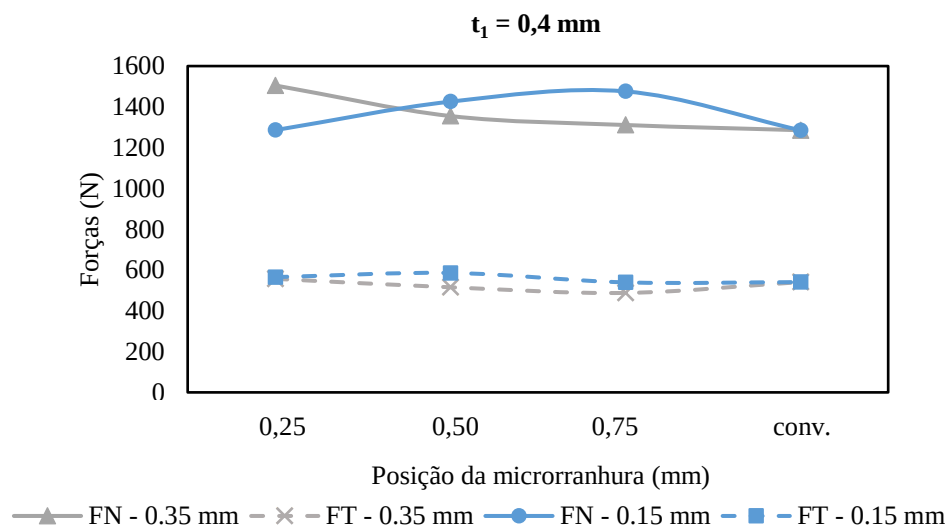


Figura 153: Forças normais e tangenciais obtidas com ferramentas com microrranhura à 0,40 mm de espessura de corte .

Por fim, as forças obtidas durante usinagem com a espessura de corte de 0,40 mm são mostradas na Figura 153, e os dados relativos a esta espessura de corte são apresentados na Tabela 25. As forças normais apresentaram aumentos de 2 a 17%, enquanto as forças tangenciais variaram com reduções de 4,7 % até aumentos de 8,3%. Com isso, nesta espessura de corte as microrranhuras também foram ineficazes.

Tabela 25: Dados relativos à espessura de corte de 0,40 mm.

Ferramenta	Distância da microrranhura da aresta – l_1 (mm)	Largura da microrranhura – l_2 (mm)	Razão de contato – r_{ct}	Ângulo de trajetória correspondente – η (°)	Posição da microrranhura / Espessura de corte – l_1/t_1	Largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural
LG0.25	0,25	0,35	0,99	44	0,63	25,74%
SG0.25	0,25	0,15	1,09	44	0,63	11,73%
LG0.50	0,50	0,35	1,07	33	1,25	25,74%
SG0.50	0,50	0,15	1,09	33	1,25	11,73%
LG0.75	0,75	0,35	1,13	28	1,88	25,74%
SG0.75	0,75	0,15	1,37	28	1,88	11,73%

* comprimento de contato da condição convencional = 1,36 mm

Tendo em vista todos os dados apresentados de força apresentados, bem como a os dados mostrados na Tabelas anteriores, algumas considerações podem ser realizadas. As variáveis que podem ser relacionadas são a espessura de corte , ângulo de trajetória, tipologia do corte derivativo, posição da microrranhura, redução da área de contato e largura da microrranhura.

Um dos fatores mais relevantes para a comparação dos resultados neste estudo foram as profundidades de corte. Até a espessura de corte de 0,15 mm as microrranhuras apresentaram reduções significativas, e, a partir disso, as microrranhuras foram ineficientes ou até mesmo apresentaram aumento de forças. Desta forma, dentre as 48 condições avaliadas com as ferramentas com microrranhuras (6 ferramentas em 8 profundidades de corte), 30 delas não apresentaram relevância frente ao uso de microrranhuras, no que tange a redução de forças de corte, representando as condições de 0,20 mm de espessura de corte até 0,40 mm de espessura de corte .

Tal observação condiciona que, para elevadas profundidades de corte ortogonal, que são coincidentes com maiores velocidades de avanço no torneamento, novas propostas de posicionamento de microrranhuras devem ser consideradas. Fator comum ao aumento dos esforços é a tendência de aumento do ângulo de trajetória frente ao aumento da espessura de corte , parâmetro este comparativo que foi determinado através da aplicação de ferramentas de contato restrito. Para a espessura de corte de 0,05 mm, foram observados valores de 0 à 23° (Tabela 18), enquanto que para a espessura de corte de 0,10 mm foram observados valores de 0 à 28° (Tabela 19) chegando a valores de 20 à 31° durante a espessura de corte de 0,15 mm (Tabela 20). A partir da espessura de corte de 0,20 mm, os valores do ângulo de trajetória passam a atingir valores de 23 a 35°, 21 a 38°, 23 a 41° e 33 a 43°, respectivamente para as

profundidades de corte de 0,20 mm (Tabela 21), 0,25 mm (Tabela 22), 0,30 mm (Tabela 23), 0,35 mm (Tabela 24) e 0,40 mm (Tabela 25).

Dessa maneira, o aumento de forças relacionados a maiores ângulos de inclinação estão atrelados à tipologia do corte derivativo. Constatou-se que a partir da espessura de corte de 0,15 mm, as ferramentas LG0.25, LG0.50 e SG0.25 passaram a ter corte derivativo induzido mais severo. Não obstante, as ferramentas LG0.75 e SG0.50 apresentaram corte derivativo induzido a partir de 0,25 mm de espessura de corte. Isto posto, o valor decrescente para a relação entre a posição da microrranhura e espessura de corte (l_1/t_1) tem relação com formação do corte derivativo induzido, considerando o limiar observado para esta relação em torno de 2,5 para as microrranhuras mais próximas a aresta de corte e 5 para as microrranhuras na posição intermediária.

Comparando esta afirmação com as regiões 1, 2 e 3 propostas por Sugihara et al. (2021), apesar de os autores não terem proposto a relação l_1/t_1 , mas esta ter sido uma interpretação de seus resultados, há de se observar que valor ótimo obtido para este parâmetro na região de redução de forças de corte foi 2, ao passo que nesta investigação tais condições ficaram pouco acima. Tal fato pode estar relacionado a condição de que Sugihara et al. (2021) avaliaram apenas uma condição de microrranhura em diferentes profundidades de corte, ao passo que nesta investigação foram avaliadas 6 condições distintas de microrranhura em 8 profundidades de corte distintas.

Comparando as ferramentas com microrranhura com as ferramentas de contato restrito, a redução do comprimento de contato poderia ser a justificativa mais lógica para a interpretação dos dados referentes as forças de corte. No entanto, a razão de contato mostrou que, para a presença de corte derivativo, o comprimento de contato é aumentado. Ademais, a relação entre comprimento de contato com ferramentas de corte com microrranhura e forças de corte não é tão direta. Retomando a Figura 52 até a Figura 56, as microrranhuras de 0,35 mm foram as que apresentaram comprimentos de contato efetivos mais próximos da ferramenta de corte convencional. Os dados da Tabela 18 à Tabela 20 mostram que as ferramentas com microrranhuras de 0,35 mm obtiveram em sua maioria, valores de razão de contato r_{ct} menores do que as ferramentas com microrranhuras de 0,15 mm. Para tanto, a razão de contato pode indicar a redução da área de contato, mas este não é o fator único determinante para avaliação de ferramentas com microrranhura.

A explicação sobre o efeito de alteração nas forças de corte se comparadas as mudanças de contato entre cavaco e ferramenta podem ser explicitadas de acordo com a Figura 154.

Apesar de a razão de contato mostrar que o comprimento de contato geral é aumentado na presença de corte derivativo, há pontos na região interna da microrranhura que, se não forem totalmente preenchidos, podem resultar em reduções momentâneas de contato, como indicado na cor verde na referida Figura. Em complemento, a formação de uma região de contato de predominância aderência, mesmo nesse caso, pode influenciar no aumento das forças de corte. Tal evidência é reforçada pelas imagens em MEV realizadas nos cavacos e como indicado abaixo, nos quais para a espessura de corte de 0,25 mm o corte derivativo foi induzido pelo ângulo de trajetória, ao passo que à 0,05 mm de espessura de corte, o corte derivativo foi comum.

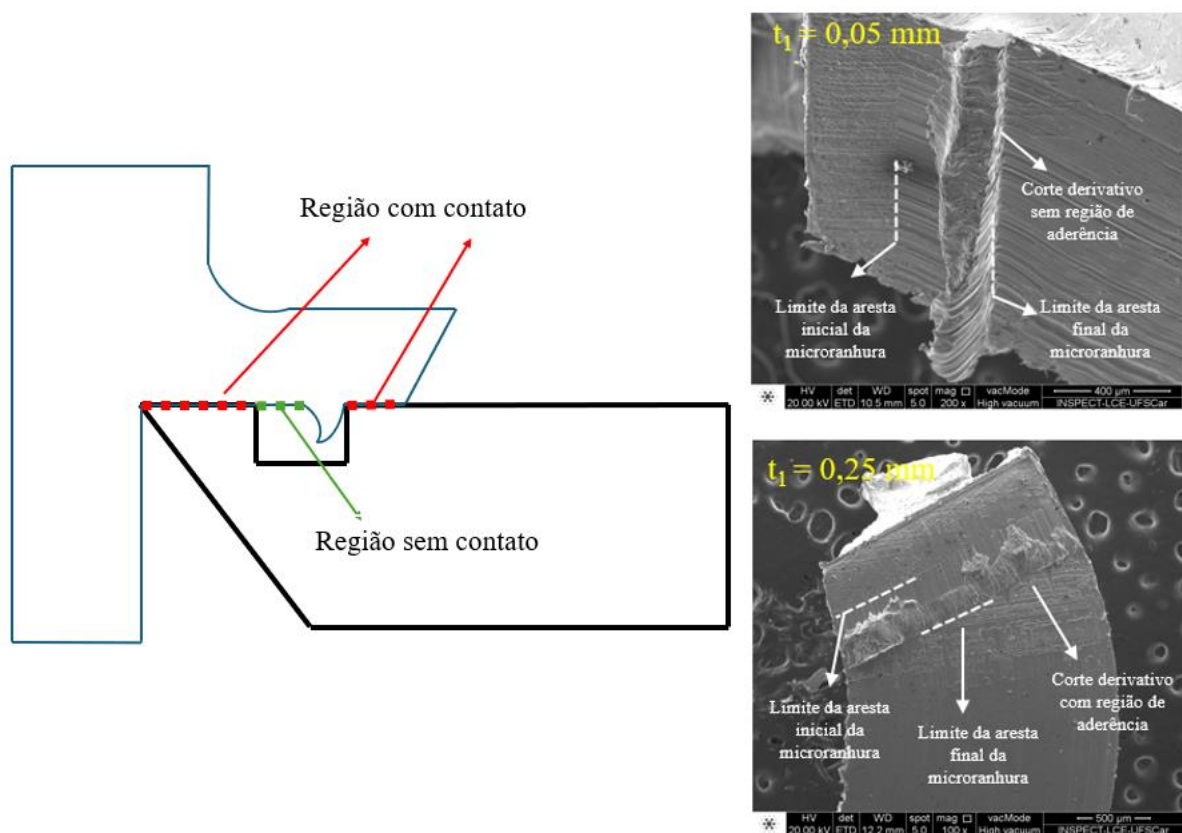


Figura 154: Relação de contato cavaco e ferramenta com a presença de corte derivativo.

Outro ponto discutível é a largura da microrranhura, considerando que muitos trabalhos apresentam micro e nano escala para a fabricação das modificações superficiais. Avaliando a gama de profundidades de corte de 0,05 a 0,15 mm, a microrranhura de 0,35 mm de largura foi avaliada em 3 posições diferentes e em 3 profundidades de corte, totalizando 9 aplicações. Dentre as 9 aplicações, esteve relacionado a 7 condições de redução de força normal e força tangencial. Em relação as microrranhuras de 0,15 mm, com as mesmas 9 combinações, eles se

relacionam com 7 condições de redução de força normal e 5 condições de força tangencial. Isto posto, as microrranhuras de 0,35 mm de largura são recomendadas dentre as variadas condições. De fato, o corte derivativo induzido foi mais facilmente identificado nas ferramentas de corte com microrranhuras de 0,35 mm, enquanto com as ferramentas de microrranhuras de 0,15 mm, não foi possível observá-lo na condição SG0.75. Mas, o exposto na Figura 154 pode ter ocorrido com mais frequência nas microrranhuras maiores, devido a necessidade de um maior volume de cavaco para o total preenchimento.

Junto a isso, a relação de largura da microrranhura em relação ao comprimento de contato natural, mostrada na Tabela 18 à Tabela 25, mostram, como esperado, uma relação percentual maior para as microrranhuras maiores. Assim, a utilização de mais microrranhuras poderia atingir maiores proporções relativas ao comprimento de contato natural.

Aliado ao apresentado anteriormente, a distância da microrranhura da aresta de corte pode ser avaliada. Em relação a posição de 0,25 mm da aresta de corte, que foi comparada com 2 tipos de microrranhuras em 3 variações de espessura de corte, totalizando 6 condições, em 4 delas ocorreram redução das forças normais e tangenciais. Distanciando para 0,50 mm a microrranhura, em 5 de suas 6 aplicações foi possível reduzir a força normal e tangencial. Por fim, a condição de 0,75 mm de posicionamento da microrranhura relativo à aresta de corte pode reduzir em 4 de 6 aplicações as forças normais e em 3 situações as forças normais. Se comparamos os dados das forças de corte aqui apresentadas, se nota que o posicionamento das microrranhuras em 0,25 mm em relação a aresta de corte proporcionou as maiores taxas de redução de força em 0,05 mm de espessura de corte. Todavia, pensando no projeto de ferramentas que podem ser utilizadas em cenários de variações de profundidades de corte/avanço, a microrranhura posicionada a 0,50 mm da aresta de corte seria a opção mais palpável.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados, os principais fatores associados à usinagem com ferramentas de corte com microrranhura são apresentados a seguir.

À medida que a microrranhura foi afastada da aresta de corte, ocorreu uma tendência de aumento do comprimento de contato em comparação à ferramenta convencional. Os dados mostram a tendência de aumento do comprimento de contato com emprego das microrranhuras. Dentre as condições avaliadas, os menores comprimentos de contato foram obtidos com as microrranhuras posicionadas em regiões com predomínio da aderência. Tal observação acerca do aumento do comprimento de contato foi observada em termos de comprimento de contato total, comprimento de contato efetivo e razão de contato, sendo apontado melhores condições para as ferramentas com microrranhuras de 0,35 mm (LG).

Verificações realizadas na superfície de contato do cavaco puderam comprovar a presença do corte derivativo para praticamente todas as condições. O cavaco do corte derivativo tende a ficar preso ao cavaco principal, levando à conclusão equivocada da ausência desse fenômeno pelo fato da microrranhura não se apresentar totalmente preenchida.

A alteração dos comprimentos de contato apresentados pode ser elucidada pela presença do corte derivativo. Após a formação do cavaco secundário uma nova região de aderência foi observada, indicando uma repetição do corte que ocorre na aresta principal da ferramenta de corte. Comparando as microrranhuras de 0,15 e 0,35 mm de largura, a maior delas pode permitir a redução momentânea do comprimento de contato, fazendo alusão as ferramentas de contato restrito.

Quanto a característica do contato, as ferramentas com regiões de aderência mais acentuadas, indicam que a microrranhura preenchida “reestabelece” a superfície de saída e permite o polimento da superfície de contato do cavaco através da região de aderência seguida pelo deslizamento. Essa afirmação é reforçada pela observação dos cavacos das ferramentas de contato restrito, que apresentaram características similares em função do aumento do comprimento de contato. Ademais, a posição mais distante da microrranhura, em relação à aresta de corte, proporciona a formação de regiões aderentes em detrimento de regiões de deslizamento.

O grau de recalque dos cavacos formados nas ferramentas de contato restrito mostra a relação deste parâmetro com a redução do comprimento de contato. Aumentando-se gradativamente o comprimento de contato, o grau de recalque tende àquele verificado na

ferramenta convencional. O limiar desta condição foi obtido com a ferramenta de corte RC 0.75, na qual a microestrutura do cavaco foi equivalente à ferramenta convencional, altamente encruada. Em adição, o ângulo de trajetória positivo dos cavacos formados nas ferramentas de contato restrito, verificados com RC0.25, RC1.25 e RC0.75, pôde efetivamente reduzir o comprimento de contato, ao passo que ângulo de trajetória nulo, verificados nas ferramentas RC1.00, RC1.25 e RC1.75 chegou mais próximas do contato natural.

O mecanismo de formação do corte derivativo pode se dar de duas maneiras distintas. A primeira pela interação do cavaco com a microrranhura, havendo deformação elástica, plástica e finalmente cisalhamento, de maneira progressiva, sendo esse o corte derivativo comum. Ou então, quando ocorre o corte derivativo induzido pelo ângulo de trajetória do cavaco, este mais severo, uma vez que o cavaco é direcionado no interior da microrranhura, tendo cisalhamento, praticamente, de maneira imediata. Isto posto, a condição para estes mecanismos está relacionada à posição da microrranhura e à espessura de corte, dado pela relação l_1/t_1 . Desconsiderando a posição de 0,75 mm das microrranhuras, valores de l_1/t_1 de 2,5 e 5 foram os limiares para a presença do corte derivativo induzido.

O corte derivativo também pode ser determinado através de imagens obtidas em QSD. No entanto, as elevadas deformações do cavaco e do cavaco secundário dificultaram a observação das linhas de escoamento e a obtenção de maiores informações acerca das condições de contato entre cavaco e ferramenta com microrranhura.

Adicionalmente aos dados apresentados, o grau de recalque tende a acompanhar as relações de contato com o emprego de ferramentas microrranhuradas. A ferramenta LG0.25 reduziu o grau de recalque até uma espessura de corte de 0,10 mm, ao passo que a ferramenta SG0.25 reduziu o grau de recalque apenas na espessura de corte de 0,05 mm. Posicionando a microrranhura em 0,50 mm da aresta de corte, apenas a ferramenta LG0.50 reduziu o grau de recalque até 0,10 mm de espessura de corte, enquanto a 0,75 mm da aresta de corte, as microrranhuras apresentaram efeito negativo sobre este parâmetro. Em vista disso, pôde-se observar que a microrranhura mais larga suprimiu o contato, mesmo que momentâneo, entre o cavaco e a ferramenta fazendo com o grau de recalque fosse minimizado.

Os valores referentes à força de usinagem vêm complementar o comportamento dos resultados até aqui apresentados. Tendo sido empregadas 8 profundidades de corte diferentes, em apenas 3 delas, de 0,05 a 0,15 mm, a microrranhura se mostrou efetiva na redução da força de usinagem. Com o aumento da espessura de corte, o corte derivativo foi induzido pelo maior ângulo de trajetória do cavaco, fazendo com que o preenchimento da microrranhura fosse

premature e aumentasse a força de usinagem. Juntamente a isso, a ampliação das regiões de aderência se mostrou prejudicial, aumentando a força a partir de 0,2 mm de espessura de corte .

Por fim, considerando a minimização da força de usinagem, a microrranhura de 0,35 mm de largura posicionada 0,50 mm da aresta de corte seria a recomendação para uma ferramenta de corte otimizada que viesse a ser aplicada em diversas condições de usinagem.

Como desdobramento desta pesquisa, são sugeridos os seguintes pontos para possíveis trabalhos futuros:

Preenchimento com nanotubos de carbono: identificada as melhores e piores condições, o preenchimento das microrranhuras com nanotubos de carbono é um ponto que irá colaborar com o desenvolvimento do corte a seco. Para tanto, um setup de corte ortogonal que permita a filmagem e conceda a usinagem maiores temperaturas de corte será necessário.

Maior aprofundamento do uso do *quick-stop*: utilizando ferramentas de corte de carbeto de tungstênio com microrranhuras será possível investigar mais velocidades de corte e consequentemente as temperaturas de usinagem, juntamente a aplicação de nanotubos de carbono. Além disso, o monitoramento da temperatura na ferramenta de corte poderá gerar mais informações correlacionadas aos cavacos obtidos.

Uso de outros materiais de usinagem: em complemento a sugestão anterior, a usinagem de aço de baixo e médio carbono, permitida pelo uso de ferramentas de carbeto de tungstênio, irá proporcionar uma melhor visualização dos contornos de grão, permitindo análises e compreensão mais aprofundada acerca da deformação do cavaco frente ao corte derivativo. Juntamente ao exposto, a análise das regiões de contato pode fornecer mais subsídios para verificação assertiva das condições de atrito.

Filmagem em maiores velocidades de corte: a aplicação de um sistema de filmagem em maiores velocidades de corte permitirá a comparação dos fenômenos observados nesta pesquisa frente a velocidades de corte usuais na indústria.

Novas geometrias de ferramentas e microrranhuras: considerando os resultados apresentados, propor novas microrranhuras que minimizem o corte derivativo e que possam ao mesmo tempo reduzir a área de contato é um ponto fundamental. Ademais, investigar ângulos de saída positivos junto as microrranhuras pode ser fundamental para minimizar o ângulo de trajetória do cavaco.

6 REFERÊNCIAS

ALAGAN, N. T. et al. Influence of surface features for increased heat dissipation on tool wear. **Materials**, v. 11, n. 5, p. 1–17, 2018.

ALBRECHT, P. New developments in the theory of the metal-cutting process: part I. The ploughing process in metal cutting. **Journal of Engineering for Industry**, v. 82, n. 4, 1960.

ARMAREGO, E. J. A.; BROWN, R. H. On the size effect in metal cutting. **International Journal of Production Research**, v. 1, n. 3, p. 75–99, 1961.

ARSLAN, A. et al. Surface Texture Manufacturing Techniques and Tribological Effect of Surface Texturing on Cutting Tool Performance: A Review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 41, n. 6, p. 447–481, 2016.

ARULKIRUBAKARAN, D.; SENTHILKUMAR, V.; KUMAWAT, V. Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: An experimental and numerical approach. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 54, p. 165–177, 1 jan. 2016.

BEER, F. et al. **Mecânica Vetorial para Engenheiros - Dinâmica**. [s.l.] Bookman Editora, 2019.

CHAO, B. T.; TRIGGER, K. J. Controlled contact cutting tools. **Journal of Engineering for Industry**, v. 81, n. 2, p. 139–147, 1959.

CHEN, Y.; WANG, J.; CHEN, M. Enhancing the machining performance by cutting tool surface modifications: a focused review. **Machining Science and Technology**, v. 23, n. 3, p. 477–509, 4 maio 2019.

CREVELING, J. H.; JORDAN, T. F.; THOMSEN, E. G. Some Studies of Angle Relationships in Metal Cutting. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**, v. 79, n. 1, p. 127–137, 1957.

DE CHIFFRE, L. Cutting tools with restricted contact. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 22, n. 4, p. 321–332, 1982.

DE CHIFFRE, L. **Restricted contact tools and cutting fluids in machining**. 6th Int. Coll. Tribol. TAE. **Anais...**1988.

DE CHIFFRE, L.; WANHEIM, T. What can we do about chip formation mechanics? **CIRP Annals**, v. 34, n. 1, p. 129–132, 1985.

DENG, J. et al. Friction and wear behaviors of the carbide tools embedded with solid lubricants in sliding wear tests and in dry cutting processes. **Wear**, v. 270, n. 9–10, p. 666–674, 4 abr. 2011.

DOYLE, E. D.; HORNE, J. G. Adhesion in metal cutting: anomalies associated with oxygen. **Wear**, v. 60, p. 383, 1980.

DOYLE, E. D.; HORNE, J. G.; TABOR, D. Frictional interactions between chip and rake face in continuous chip formation. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 366, n. 1725, p. 173–183, 1979.

DUAN, R. et al. Experimental assessment of derivative cutting of micro-textured tools in dry cutting of medium carbon steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9–12, p. 3531–3540, 1 out. 2017.

DUAN, R. et al. A thermo-mechanical coupled model of derivative cutting of microtextured tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 9–12, p. 2849–2863, 2018a.

DUAN, R. et al. An approach to predict derivative-chip formation in derivative cutting of micro-textured tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1–4, p. 973–982, 1 mar. 2018b.

DUAN, R. et al. Effect of derivative cutting on machining performance of micro textured tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 45, p. 544–556, 1 set. 2019.

DUAN, R.; WANG, G.; XING, Y. Investigation of novel multiscale textures for the enhancement of the cutting performance of Al₂O₃/TiC ceramic cutting tools. **Ceramics International**, v. 48, n. 3, p. 3554–3563, 1 fev. 2022.

DUGDALE, D. S.; ENAHORO, H. E. Energy absorbed in metal cutting. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 3, n. 4, p. 219–225, 1964.

ENOMOTO, T. **Development of a cutting tool with micro engineering surface**. Proceedings of Spring Conference of the Japan Society for Precision Engineering, 2006. **Anais...**2006.

ENOMOTO, T. et al. Development of a cutting tool with micro structured surface. **Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C**, v. 73, n. 729, p. 288–293, 2007.

ENOMOTO, T.; SUGIHARA, T. Development of a cutting tool with nano/micro-textured surface. Improvement of anti-adhesive effect. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C**, v. 74, n. 745, p. 2315–2320, 2008.

ENOMOTO, T.; SUGIHARA, T. Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano-/micro-textures. **CIRP annals**, v. 59, n. 1, p. 597–600, 2010.

ESCH, P. et al. Methodic development of laser micro structured cutting tools with microscale textures for AW7075 aluminum alloy using a Plackett–Burman screening design. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 32, p. 188–195, 1 jan. 2021.

EVANS, C. J.; BRYAN, J. B. “Structured”, “textured” or “engineered” surfaces. **Cirp Annals**, v. 48, n. 2, p. 541–556, 1999.

FANG, N.; JAWAHIR, I. S. An analytical predictive model and experimental validation for machining with grooved tools incorporating the effects of strains, strain-rates, and temperatures. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, p. 83–86, 2002.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. [s.l.] Edgard Blücher, 1977.

GAD, G. S.; ARMAREGO, E. J. A.; SMITHJ, A. J. R. Tool-chip contact length in orthogonal machining and its importance in tool temperature predictions. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 3, p. 485–501, 1992.

HSU, T. C. A study of the normal and shear stresses on a cutting tool. **Journal of Engineering for Industry**, v. 88, n. 1, 1966.

JAEGER, J. C. Moving Sources of Heat and The Temperature at Sliding Contacts. **Proc. R. Soc.**, v. 76, p. 203–224, 1942.

JÄGER, H. et al. EDS Analysis of Flank Wear and Surface Integrity in Machining of Alloy 718 with Forced Coolant Application. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 271–274, 2016.

JAWAHIR, I. S. An experimental and theoretical study of the effects of tool restricted contact on chip breaking. **Tese de Doutorado, UNSW Sydney.**, 1986.

JAWAHIR, I. S.; OXLEY, P. L. B. The Tool Restricted Contact Effect as a Major Influencing Factor in Chip Breaking: An Experimental Analysis. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 37, n. 1, p. 121–126, 1988.

JIANXIN, D. et al. Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 30, n. 1, p. 164–172, 2012.

JIANXIN, D.; WENLONG, S.; HUI, Z. Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 1, p. 66–72, 2009.

JIRANDEHI, A. P.; HAGHSHENAS, A.; KHONSARI, M. M. Fatigue analysis of high-carbon steel at different environmental temperatures considering the blue brittleness effect. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 230, p. 107546, 15 set. 2022.

JOHNSON, G. R.; COOK, W. H. **A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures**. (7th International Symposium on Ballistics, Ed.)1983.

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

KAWASEGI, N. et al. Development and machining performance of a textured diamond cutting tool fabricated with a focused ion beam and heat treatment. **Precision Engineering**, v. 47, p. 311–320, 1 jan. 2017.

KIM, D. M. et al. Influence of a micropatterned insert on characteristics of the tool-workpiece interface in a hard turning process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 160–171, 2016.

KISHAWY, H. A. et al. Micro-textured cutting tools: Phenomenological analysis and design recommendations. **CIRP Annals**, v. 70, n. 1, p. 65–68, 1 jan. 2021.

KISHAWY, H. A. et al. An analytical model for the optimized design of micro-textured cutting tools. **CIRP Annals**, v. 71, n. 1, p. 49–52, 1 jan. 2022.

KLOCKE, F.; KUCHLE, A. Cutting Fluids. Em: KLOCKE, F. (Ed.). **Manufacturing Processes 1**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 219–236.

KOSHY, P.; TOVEY, J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 153–156, 2011.

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**, v. 215, n. May, p. 62–70, 2015.

LAL, G. K. **AN EXPERIMENTAL STUDY OF OBLIQUE CUTTING WITH SINGLE-EDGED TOOLS**. **J. Mach Tool. Des Res.** [s.l: s.n.].

LIAN, Y. et al. Preparation of tungsten disulfide (WS₂) soft-coated nano-textured self-lubricating tool and its cutting performance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9–12, p. 2033–2042, 2013.

LO, S. Y.; LODE, U.; ARMAREGO, E. J. A. Experiments with controlled-contact tools. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 6, n. 3, p. 115–127, 1966.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A.; COELHO, R.; T.; SILVA, M.; B. **Teoria da usinagem dos metais**. Blucher, 2ª edição, São Paulo, 2011.

MERCHANT, M. E. Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in orthogonal cutting. **Journal of Applied Physics**, v. 16, n. 6, p. 318–324, 1945.

MISHRA, S. K.; GHOSH, S.; ARAVINDAN, S. Characterization and machining performance of laser-textured chevron shaped tools coated with AlTiN and AlCrN coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 334, n. July 2017, p. 344–356, 2018.

MITTAL, R. N.; JUNEJA, B. L. Effect of stress distribution on the shear angle ϕ in controlled contact orthogonal cutting. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 22, n. 2, p. 87–96, 1982.

MOORE, D. F. A history of research on surface texture effects. **Wear**, v. 13, n. 6, p. 381–412, 1969.

NAKAYAMA, K. A Study on Chip-Breaker. **Bulletin of JSME**, v. 5, n. 17, p. 142–150, 1960.

OBIKAWA, T. et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 12, p. 966–972, 2011.

OXLEY, P. L. B. An analysis for orthogonal cutting with restricted tool-chip contact. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 4, n. 2, p. 129–135, 1962.

OXLEY, P. L. B. The mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability. **Ellis Horwood**, p. 242, 1989.

RIBEIRO, F. et al. Applications of texturization techniques on cutting tools surfaces-a survey. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2020.

RIBEIRO, F. S. F. **Avaliação de ferramentas de corte texturizadas preenchidas com nanotubos de carbono**. Dissertação de Mestrado—Bauru: UNESP, 2019.

RIBEIRO, F. S. F. et al. Machining behavior using micro-grooved cutting tools filled with carbon nanotubes. **Tribology International**, v. 192, 1 abr. 2024.

SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Recent advances in turning with textured cutting tools: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 701–715, 2016.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. [s.l.] Oxford university press New York, 2005. v. 2

SHI, T.; RAMALLINGAM, S. Modeling chip formation with grooved tools. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 35, n. 9, p. 741–756, 1993.

SIJU, A. S.; GAJRANI, K. K.; JOSHI, S. S. Dual textured carbide tools for dry machining of titanium alloys. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 94, 1 jan. 2021.

SIJU, A. S.; WAIGAONKAR, S. D. Effects of rake surface texture geometries on the performance of single-point cutting tools in hard turning of titanium alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 69, p. 235–252, 1 set. 2021.

SON, S. M.; LIM, H. S.; AHN, J. H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 4–5, p. 529–535, abr. 2005.

STABLER, G. V. The Fundamental Geometry of Cutting Tools. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 165, n. 1, p. 14–26, jun. 1951.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface—Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns. **Precision Engineering**, v. 33, n. 4, p. 425–429, 1 out. 2009.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture. **Precision Engineering**, v. 36, n. 2, p. 229–237, 1 abr. 2012.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces. **Precision Engineering**, v. 37, n. 4, p. 888–896, 1 out. 2013.

SUGIHARA, T.; KOBAYASHI, R.; ENOMOTO, T. Direct observations of tribological behavior in cutting with textured cutting tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 168, 2021a.

SUGIHARA, T.; KOBAYASHI, R.; ENOMOTO, T. Direct observations of tribological behavior in cutting with textured cutting tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 168, 1 set. 2021b.

TAKEYAMA, H.; USUI, E. The effect of tool-chip contact area in metal machining. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**, v. 80, n. 5, p. 1089–1093, 1958.

TOROPOV, A.; KO, S. L. Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 12, p. 1209–1215, set. 2003.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. Fourth Edition ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2000.

USUI, E.; KIKUCHI, K.; HOSHI, K. The theory of plasticity applied to machining with cut-away tools. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 86, n. 2, p. 95–104, 1964.

USUI, E.; SHAW, M. C. Free machining steel-IV: Tools with reduced contact length. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 84, n. 1, p. 89–98, 1962.

USUI, E.; TAKEYAMA, H. A Photoelastic Analysis of Machining Stresses. **Journal of Engineering for Industry**, v. 82, n. 4, p. 303–307, 1 nov. 1960.

VIEREGGE, G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe. **Stahleisen**, 1959.

WALDORF, D. J.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. **A Slip-Line Field for Ploughing During Orthogonal Cutting**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>>.

WALLACE, P. W.; BOOTHROYD, G. Tool Forces and Tool-Chip Friction in Orthogonal Machining. **Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 6, n. 1, p. 74–87, mar. 1964.

WENLONG, S. et al. Performance of a cemented carbide self-lubricating tool embedded with MoS₂ solid lubricants in dry machining. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 13, n. 1, p. 8–15, 2011.

WOODWARD, R. L. Determination of Plastic Contact Length Between Chip and Tool in Machining. **Journal of Engineering for Industry**, 1977.

WORTHINGTON, B. The operation and performance of a groove-type chip forming device. **International Journal of Production Research**, v. 14, n. 5, p. 529–558, 1976.

WRIGHT, P. K. Frictional interactions in machining: Comparisons between transparent sapphire and steel cutting tools. **Metals Technology**, v. 8, n. 1, p. 150–160, 1 abr. 1981.

WU, Z. et al. Performance of the micro-texture self-lubricating and pulsating heat pipe self-cooling tools in dry cutting process. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 45, p. 238–248, 2014.

WU, Z. et al. Numerical investigation of the performance of micro-textured cutting tools in cutting of Ti-6Al-4V alloys. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 1–2, p. 463–474, 1 maio 2020.

XING, Y. et al. Effect of laser surface texturing on Si₃N₄/TiC ceramic sliding against steel under dry friction. **Materials and Design**, v. 52, p. 234–245, 2013.

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

ZHANG, K. et al. Effect of micro/nano-scale textures on anti-adhesive wear properties of WC/Co-based TiAlN coated tools in AISI 316 austenitic stainless steel cutting. **Applied Surface Science**, v. 355, p. 602–614, 2015.

ZHOU, X. et al. A comprehensive review of tool surface texturing in the cutting process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 123, n. 7–8, p. 2427–2467, 1 dez. 2022.

ZOREV, N. N. Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. **International research in production engineering, ASME, New York**, 1963.