

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DHIEGO DE GODOI DIAS

Usinagem de microparedes

São Carlos -SP

2018

DHIEGO DE GODOI DIAS

Usinagem de microparedes

Exame de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Manufatura

Orientador: Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius

**ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA. A
VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA- SE
DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-
USP**

São Carlos - SP

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D541u Dias, Dhiego de Godoi
 Usinagem de microparedes / Dhiego de Godoi Dias;
 orientador Renato Goulart Jasinevicius . São Carlos,
 2018.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
 Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2018.

 1. Microparedes . 2. Microfabricação. 3. RSA 6061.
 4. Fresa de disco. 5. Disco de corte abrasivo. 6.
 Skewness. 7. Kurtosis. 8. Microtrocador de calor. I.
 Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DHIEGO DE GODOI DIAS**.

Título da dissertação: "Usinagem de microparedes".

Data da defesa: 18/06/2018.

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Renato Goulart Jasinevicius**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Luiz Antonio Oliveira Araújo**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **André da Motta Gonçalves**
(Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São
Paulo/Araraquara)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

A Deus por toda a provisão em tempos difíceis.

Agradecimentos

Aos meus pais por sempre me apoiarem e por proverem recursos materiais e imateriais para que todo o projeto fosse concluído. A minha esposa por sempre me apoiar em todos os momentos com muito amor e compreensão. Ao meu irmão sua família pelo carinho

Ao Professor Associado Renato Goulart Jasinévicius pelas inúmeras sugestões, correções, discussões sobre o assunto curricular e pelos bons conselhos para vida.

Aos docentes Professor Doutor Alessandro Roger e Professor Doutor Luiz Araújo pelas orientações e auxílio na confecção de ensaios para análise deste trabalho.

Ao Professor Titular Reginaldo Teixeira Coelho pela disponibilidade do laboratório para a confecção de diversos ensaios usinagem.

Aos técnicos de laboratório José Carlos Risardi e Tiago Monteiro Camponucci pelo auxílio nos trabalhos experimentais.

Ao amigo Ricardo Arai por muito me ajudar na confecção de ensaios de usinagem quando não, o mesmo se dispondo para fazê-lo em meu auxílio.

Aos colegas de laboratório José Antônio Otoboni, Marcel Dib, Igor Basso, Jonathan Franciesco Ribeiro Araújo, Daniel Secco, Marcelo Ferreira Batista e Flávio Manarelli por sempre estarem dispostos a uma conversa amistosa e conselhos para ajudarem na fabricação deste trabalho.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida.

Resumo

DIAS, D.G. **Usinagem de microparedes**. 2018. 109p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Este trabalho consiste na fabricação de microparedes em alumínio 6061 rapidamente solidificado e em cobre eletrolítico pelos processos de remoção de material de fresamento, sangramento e corte com disco abrasivo para se obter as melhores condições de corte. A fabricação de microtrocadores de calor é a mais promissora e provável aplicação de microparedes utilizando materiais com boa condutibilidade térmica, assim, conhecer as condições de corte dos processos envolvidos na produção desses elementos é imprescindível para o controle das características superficiais e dimensionais das paredes. O estudo consistiu em fabricar as microparedes com objetivo de se resolver os principais defeitos da formação das mesmas ou melhorar as condições de corte para minimizar esses erros. Os principais efeitos conhecidos na literatura sobre microfabricação averiguados nesse trabalho foram, efeito de escala, deformações nas microparedes e a formação de rebarbas de acordo com a literatura científica. As paredes formadas tiveram como medidas $1,00mm \times 10,00mm \times 0,15mm$ de altura, comprimento e largura respectivamente formando assim uma razão de aspecto de 6,5 (altura da parede/largura da parede). Os parâmetros de avaliação foram quanto a flexão da estrutura e de rugosidade superficial S_{sk} e S_{ku} . Essa avaliação se deu em detrimento da possível e mais provável aplicação de microtrocadores de calor, na qual, o controle da superfície e a estrutura da parede são essenciais para troca de calor. Da fabricação, o processo mais promissor foi o de fresamento tangencial que realizou, com satisfação, todas as expectativas a um baixo custo de ferramenta.

Palavras-chave: Microparedes. Microfabricação. RSA 6061. Fresa de disco. Disco de corte Abrasivo. Skewness. Kurtosis. Microtrocador de calor.

Abstract

DIAS, D.G. **Machining of micro-walls**. 2018. 109p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

This work consists of the manufacture of micro-walls in rapidly solidified aluminum 6061 and electrolytic copper by the processes of removal of material of milling, face grooving and dicing. The manufacture of heat exchanger micro-channels is the most promising and probable application of micro-walls using materials with good thermal conductivity, thus, knowing the cutting conditions of the processes involved in the production of these elements is essential for surface and dimensional control. The study consisted in fabricating the micro-wall in order to solve the main defects in the formation of the microparts or to improve the cutting conditions to minimize these errors. The main defects known in the literature on microfabrication investigated in this work are size effect, plowing and burr formation according to the scientific literature. The walls formed had as dimensions 1.00mm x 10.00mm x 0.15mm height, length and width respectively forming an aspect ratio of 6.5 (height of the wall/ width of the wall). The evaluation parameters were for flexural strength and surface roughness S_{sk} and S_{ku} . This evaluation occurred to the detriment of the possible and more probable application of heat exchanger microchannels, in which surface control is essential for heat exchange. Of the manufacturing, the most promising process was tangential milling, which performed with satisfaction all expectations at a low tool cost.

Keywords: Micro-walls. Microfabrication. RSA 6061. Slotting milling disc. Dicing disc. Skewness. Kurtosis. Micro-heat exchanger.

Lista de Figuras

FIGURA 1 DIAGRAMA DA FORMAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA USINADA DE SATA (1985).....	31
FIGURA 2 TIPOS DE REBARBA PARA O FRESAMENTO DE TOPO.	33
FIGURA 3 ESTÁGIOS DE FORMAÇÃO DA REBARBA INDEPENDENTE DO MATERIAL	35
FIGURA 4 DESENVOLVIMENTO DA REBARBA PARA MATERIAIS FRÁGEIS.....	35
FIGURA 5 DESENVOLVIMENTO DA REBARBA PARA MATERIAIS DÚCTEIS.	36
FIGURA 6 . INTERAÇÃO DA FRENTE DA FERRAMENTA COM O MATERIAL QUANDO A ESPESSURA DE CORTE H É PEQUENA.....	39
FIGURA 7 FACEAMENTO DE PEÇA NO TORNO DE ULTRA PRECISÃO RANK PNEUMO ASG 2500	45
FIGURA 8 IMAGEM DO PERFILÓMETRO MOSTRANDO RUGOSIDADE DA PEÇA.....	46
FIGURA 9 PEÇA DE ENSAIO DO TIPO ESQUADREJADA; A) VISTA LATERAL; B)VISTA SUPERIOR; C) FOTO EM PERFIL	47
FIGURA 10 A)PROCEDIMENTO DE CORTE DE CANAIS USANDO FERRAMENTA DO TIPO BEDAME; B) DETALHE DO CORTE OS CANAIS FORMADOS.....	48
FIGURA 11 DISCO DE FRESAMENTO TANGENCIAL.	51
FIGURA 12 DESENHO ESQUEMÁTICO DA PASTILHA DE BEDAME SANDIVIK.....	51
FIGURA 13 A) SUPERFÍCIE DA ARESTA DE CORTE DO BEDAME COM AMPLIFICAÇÃO DE 20X ; B) VISTA TRIDIMENSIONAL DA MESMA ARESTA; C) CORTE EM UMA DETERMINADA POSIÇÃO PARA ANALISAR O PERFIL DO RAO DE ARESTA.....	52
FIGURA 14 MONTAGEM FEITA PARA OS CORTES COM DISCO ABRASIVO NA MÁQUINA DE CORTE COM DISCO ABRASIVO, A) VISTA GERAL DA MONTAGEM E; B) DETALHE DA MONTAGEM DA PEÇA SOBRE A MESA DA MÁQUINA.	54
FIGURA 15 ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CORTE NA PEÇA DE TRABALHO.	56
FIGURA 16 COMPORTAMENTO DA ESPESSURA DA PAREDE DE ACORDO COM AS CONDIÇÕES DA TAB. 11.....	58
FIGURA 17 A) ENTRADA DE CANAL PARA CONDIÇÃO C1; B) REBARBA DE SAÍDA PARA CONDIÇÃO C1; C) SAÍDA DE CANAL PARA CONDIÇÃO C6; REBARBA DE SAÍDA PARA CONDIÇÃO C6. CONDIÇÕES DADAS SEGUNDO A TABELA 11	59
FIGURA 18 COMPORTAMENTO DO VALOR SKEWNESS NO FUNDO DE CANAL PARA AS CONDIÇÕES DA TABELA 11	60
FIGURA 19 COMPORTAMENTO DO VALOR SKEWNESS NA LATERAL DO CANAL PARA AS CONDIÇÕES DA TAB.11.....	61
FIGURA 20 COMPORTAMENTO DO VALOR KUROSI PARA O FUNDO DE CANAL. IMAGEM AMPLIADA PARA O VALOR DE KURTOSIS IGUAL A 3.	62
FIGURA 21 COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE KURTOSIS PARA A LATERAL DA PAREDE. IMAGEM AMPLIADA PARA O VALOR DE KURTOSIS 3.	64
FIGURA 22 DESENHO ESQUEMÁTICO DO CONTATO DA FERRAMENTA COM A PEÇA PARA FORMAÇÃO DO CAVACO EM FRESAMENTO TANGENCIAL	65
FIGURA 23 MODELO ESQUEMÁTICO DA INTERAÇÃO DOS DENTES DA FRESA DURANTE O CORTE E OS ESFORÇOS GERADOS.	67
FIGURA 24 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PEÇA PARA OS ENSAIOS DESCRITOS NA TAB.12.....	69
FIGURA 25 A) E B) ENTRADA DA FERRAMENTA; C) E D) SAÍDA DA FERRAMENTA PARA AS CONDIÇÕES DESCRITAS NA TABELA 15.....	70
FIGURA 26 COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE S_a E S_q EM RELAÇÃO AO AVANÇO POR DENTE.	71
FIGURA 27 COMPORTAMENTO DO VALOR DE SKEWNESS EM FUNÇÃO DO AVANÇO POR DENTE.....	72
FIGURA 28 COMPORTAMENTO DO VALOR DE KURTOSIS EM FUNÇÃO DO AVANÇO POR DENTE.....	73
FIGURA 29 COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SKEWNESS EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE.....	74
FIGURA 30 COMPORTAMENTO DE KURTOSIS DO FUNDO DO CANAL EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE DA TAB.11.....	74
FIGURA 31 PERFIL DAS MICROPAREDES EM CADA CONDIÇÃO DE CORTE.	75
FIGURA 32 ESQUEMA DA MONTAGEM DO CORPO DE PROVA PARA CONFECÇÃO DO ENSAIO.	76
FIGURA 33 PAREDES CIRCULARES DE 150MM, TRÊS PRIMEIRAS DA ESQUERDA PARA DIREITA, 100MM TRÊS PRIMEIRAS PAREDES DA DIREITA PARA ESQUERDA	77
FIGURA 34PAREDES CIRCULARES DE 50MM, TRÊS PRIMEIRAS DA ESQUERDA PARA DIREITA, 100MM TRÊS PRIMEIRAS PAREDES DA DIREITA PARA ESQUERDA	78
FIGURA 35 ARESTA DE CORTE DO DISCO ABRASIVO.....	79
FIGURA 36 A) ENTRADA DA FERRAMENTA; B) SAÍDA DA FERRAMENTA; C) VISÃO SUPERIOR; D) VISÃO DE PERFIL NO CRUZAMENTO DE CANAIS.	82
FIGURA 37 A) ENTRADA DA FERRAMENTA; B) SAÍDA DA FERRAMENTA; C) VISÃO SUPERIOR; D) VISÃO DE PERFIL NO CRUZAMENTO DE CANAIS.	83
FIGURA 38 REPRESENTAÇÃO LINEAR DOS POSSÍVEIS VALORES DE SKEWNESS.	88
FIGURA 39 REPRESENTAÇÃO LINEAR DOS DIFERENTES VALORES PARA KURTOSIS.....	89

Lista de Tabelas

TABELA 1 ARTIGOS DE FORMAÇÃO DE MICROPAREDES DIVIDIDOS POR MATERIAL.....	25
TABELA 2 ARTIGOS DE REFERÊNCIA SEPARADOS TIPOS DE FABRICAÇÃO E MATERIAL NA FABRICAÇÃO DE MICROPAREDES E MICROCANAIS.	28
TABELA 3 TORNO DE PRECISÃO DA RANK PNEUMO ASG 2500 DE 1991	41
TABELA 4 ESPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA FERRAMENTA AUTOMATIC DICING SAW DAD3350 USADA PARA OS TESTES DE CORTE COM DISCO ABRASIVO	42
TABELA 5 ESPECIFICAÇÕES DA CNC HERMLE 800 USADA PARA OS TESTES DE FRESAMENTO TANGENCIAL.....	43
TABELA 6 DADOS DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL SEGUNDO A FABRICANTE RSP TECHNOLOGY.	44
TABELA 7 PROPRIEDADES DO MATERIAL SEGUNDO O FABRICANTE	44
TABELA 8 PARÂMETROS USADOS PARA FORMAÇÃO DA SUPERFÍCIE DOS COPOS DE PROVA COM ALTO GRAU DE ACABAMENTO	46
TABELA 9 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA FRESA.....	52
TABELA 10 DADOS DE RAIOS DE ARESTA MEDIDOS PELO MICROSCÓPIO CONFOCAL.....	53
TABELA 11 CONDIÇÕES DE CORTE COM TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL CONSTANTES AUMENTO A VELOCIDADE DE AVANÇO.	56
TABELA 12 ESTIMATIVA DAS ESPESSURAS MÁXIMAS DE CORTE PARA CADA CONDIÇÃO	65
TABELA 13 ESTIMATIVA DE FORÇA DE CORTE ATRAVÉS DE KIENZLE A PARTIR DOS DADOS DE CORTE.	66
TABELA 14 MOMENTO DE TORÇÃO IMPOSTO À FRESA DE DISCO ESTIMADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO (6).	68
TABELA 15 CONDIÇÕES DE CORTE PARA DETECÇÃO DO MÁXIMO AVANÇO COM FLUÍDO DE CORTE.....	69

Sumário

1.	Introdução.....	21
2.	Revisão da literatura.....	23
2.1.	Processos de fabricação e parâmetros.....	27
2.2.	Defeitos da microfabricação.....	31
2.2.1.	Formação de rebarbas.....	33
2.2.2.	Tamanho de grão.....	36
2.2.3.	Efeito de escala.....	38
3.	Materiais e Métodos.....	41
3.1.	Máquinas Ferramenta.....	41
3.1.1.	Torno de ultra precisão.....	41
3.1.2.	Máquina para corte de disco abrasivo.....	42
3.1.3.	Centro de Usinagem CNC Hermle 800.....	43
3.2.	Material da peça.....	43
3.2.1.	Liga de Alumínio.....	43
3.2.2.	Cobre eletrolítico.....	44
3.3.	Confecção dos Corpos de Prova.....	45
3.4.	Instrumentos de medição.....	49
3.4.1.	Perfilômetro Óptico.....	49
3.4.2.	Perfilômetro Confocal.....	49
3.4.3.	Microscópio Eletrônico de Varredura.....	50
3.5.	Ferramentas.....	50
3.5.1.	Fresa de disco.....	50
3.5.2.	Pastilha de bedame.....	51
3.5.3.	Discos abrasivos.....	53
4.	Resultados e discussões.....	55
4.1.	Fresamento tangencial.....	55
4.1.1.	Análise do Acabamento dos Canais e das Paredes.....	59
4.1.2.	Análise dos esforços de corte durante a usinagem.....	64
4.1.3.	Remoção das rebarbas na saída dos canais.....	68
4.1.4.	Fresamento tangencial feito em cobre eletrolítico.....	73
4.2.	Canais radiais por sangramento na face da peça.....	76
4.3.	Usinagem de canais com corte de disco abrasivo.....	79
5.	Conclusões e sugestões para futuros trabalhos.....	85
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	86

Anexo	87
Referências.....	91
Bibliografia Consultada	99

1. Introdução

A evolução de microcomponentes se deu início em 1947, no cenário pós segunda grande guerra, no laboratório da Bell Telefonía com três cientistas W. Shockley, W. Brattain e J. Bardeen. Eles desenvolveram o protótipo do primeiro transistor (FONSECA FILHO, 2007), a partir deste marco, o desenvolvimento de novas tecnologias de microfabricação ganhou território no panorama mundial.

Atualmente as micro-estruturas estão completamente imersas em nosso meio. A miniaturização de componentes pode ser observada em equipamentos comuns como os aparelhos eletrônicos de forma geral; microchips, ou em equipamentos de uso mais nobre como os aparelhos de uso médico, nano-agulhas para incisões menos intrusivas, etc. (TAKEUCHI et al., 2006). Desta forma, existe uma alta demanda de tecnologia direcionada para a microfabricação de micro-estruturas em diversos materiais.

Entretanto, o processo de microfabricação possui muitos fenômenos a serem estudados para que possa ser mais eficiente quando utilizado em grande escala. Um destes fenômenos é o efeito de escala. A remoção de material em proporções tão pequenas não se comporta de forma semelhante ao observado em macro escala. Quando se reduz de forma considerável a quantidade de material removido vários problemas começam a surgir com a interação do material da peças, ferramenta e parâmetros de corte empregado (HUO CHENG 2013)

Outro problema encontrado na produção de estruturas com escalas tão reduzidas é a alta razão de aspecto, entendido como a razão entre a altura é espessura da estrutura produzida. Os esforços resultantes do processo de remoção atuam extensivamente sobre a armação da peça formada provocando deformações indesejáveis que, muitas vezes impossibilitam o uso do componente fabricado. (DUONG et al., 2013)

A razão de aspecto e a espessura da estrutura da parede fabricada são os dois aspectos que caracterizam se a estrutura é ou não uma microparede. São consideradas micro paredes estruturas que apresentam razão de aspecto superior ao valor dois e espessura inferior a um milímetro e superior a um micrometro.

Este estudo tem como objetivo entender e controlar o processo de formação de microparedes por isso foram usados três processos de fabricação e dois materiais diferentes. Os

processos de fabricação foram selecionados visando produzir as microparedes em baixos tempo, proporcionando baixos custos, e com possibilidades para altas razões de aspecto de forma linear e curva. Os materiais foram selecionados pelas suas altas condutividades térmicas.

É importante salientar a necessidade do controle superficial para que se possa correlacionar a troca de calor de uma superfície com o seu estado de acabamento regido pelos coeficientes S_{sk} e S_{ku} .

Como estudo está direcionado na fabricação de estruturas com alta razão de aspecto a exemplo de microtrocaadores de calor, a eficiência destes dependem essencialmente de altas razões de aspectos e um bom controle superficial, e para isso devem atender a requisitos como:

- Paredes com razão de aspecto igual ou superior a 5x sem deformações laterais;
- Comparação do aspecto final das microparedes fabricadas por diferentes processos através dos parâmetros de rugosidade superficial e deformação lateral. Dentre esses o fresamento tangencial, sangramento facial e corte por disco abrasivo;
- Fabricação de microparedes em dois materiais diferentes, Alumínio Rapidamente Solidificado 6061 e cobre eletrolítico, através do processo de fresamento tangencial.

2. Revisão da literatura.

Diferentes aplicações implicam em variações significativas na razão de aspecto e espessura das paredes. Por exemplo, um microtrocador de calor necessita de altas razões de aspecto, enquanto que, em separadores de partículas são empregadas baixas razões de aspecto (PRAKASH; KUMAR, 2014). Sabendo que a razão de aspecto é descrita como a divisão da altura da parede por sua espessura.

É importante ressaltar que quando se estuda a fabricação de micro paredes é impossível desvincular a confecção de microcanais. A maioria dos estudos realizados com microcanais foram feitos em peças na qual as geometrias produzidas estão próximas umas das outras resultando, conseqüentemente, paredes delgadas.

Tuckerman e Pease (1981) foram os primeiros pesquisadores a estudarem o uso de micro paredes em microtrocadores de calor e resfriamento de cavacos. Segundo LI (2006), os fatores usados por Tuckerman e Pease para a análise qualitativa das formas das micro paredes empregadas nos trocadores foram o material da peça e a geometria dos canais.

A geometria dos canais é um parâmetro muito importante na eficiência dos trocadores. Existem uma grande quantidade de estudos que exploram várias geometrias e sua aplicabilidade. Becker e Locascio (2002) estudaram a eficiência de canais retangulares, quadrados e semicirculares; Abdelgawad et al., (2010) canais com geometria circular empregando a litográfica na produção dos mesmos e Filiz et al., (2007) geometrias com formatos gaussianos. O uso de diferentes geometrias pode apresentar considerável divergência na eficiência final, porém, nesse estudo a geometria do fundo de canal se concentrará em retangular e semicircular devido as geometrias das ferramentas usadas.

Segundo Prakash e Kumar (2014) o estudo dos microcanais e microparedes pode ser dividido em três grandes áreas relativas ao material: 1-Polímericos; 2- Metálicos e 3- Cerâmicos.

O material polimérico é majoritariamente manufaturado por LASER/Litografia, mas também pode ser manufaturado por conformação empregando prensagem a quente ou injeção. Com relação aos materiais metálicos os processos aplicados envolvem uma remoção de material através do fresamento ou aplainamento. Por fim materiais considerados duros e frágeis como os

cristais semicondutores, cerâmicos e vidros fazem do uso de processos abrasivos, usinagem a LASER, litografia e processos químicos.

Na tabela 1 podemos analisar alguns dos principais trabalhos referentes a classificação das áreas relativas ao material.

Tabela 1 Artigos de formação de microparedes divididos por material.

	Material	Processo	Aplicação	Autor
Polímero	PMMA	Laser; Litografia; Prensagem; Injeção	Detecção química; Micro	(MUCK et al., 2004); (FLORIAN; MORENZA; SERRA, 2013);(CHOUDHURY; SHIRLEY, 2010);(MATHUR et al., 2009);(BECKER; LOCASCIO, 2002); (BARKER et al., 2000)
			reatores; micro contêineres; Ensaio bioquímico. Pré- enfraquecimento de guarnições de air-bags; Aparelhos biomecânicos.	
	PDMS	Laser; Prensagem; Litografia	Aplicações biológicas (mistura de gases)	(BAO et al., 2005) (ELASTOMER et al., 2000)
	PP	Laser	Pré-enfraquecimento de	(CHOUDHURY; SHIRLEY, 2010)
	PE	Laser	guarnições de air-bags	(CHOUDHURY; SHIRLEY, 2010)
	PC	Prensagem; Injeção	Micro canais tridimensionais; Aparelhos biomecânicos.	(BECKER; LOCASCIO, 2002); (BARKER et al., 2000)
	PS	Injeção	Aparelhos biomecânicos.	(BARKER et al., 2000)
	PET	Laser	Separador químico	(ROUSSEL; GIRAULT, 2004)
	TOPAS	Laser	Detector eletroquímico	(CASTAÑO-ÁLVAREZ; FERNÁNDEZ-ABEDUL; COSTA-GARCÍA, 2005)
Zeonor®	Injeção	Detector eletroquímico	(MELA et al., 2005)	
				Continua

Tabela 1 Artigos de formação de microparedes divididos por material.

Conclusão				
	Material	Processo	Aplicação	Autor
	PVC	Impressão 3D	Micro filtros	(BECKER; LOCASCIO, 2002)
	PETG	Impressão 3D; Laser	Micro filtros; Aparelhos biomecânicos.	(BECKER; LOCASCIO, 2002);(BARKER et al., 2000)
Metálicos	Aço inoxidável	Fresamento	MECS	(SRINIVASA; SHUNMUGAM, 2013)
	Alumínio	Fresamento	Micro Moldes	(KISWANTO; ZARIATIN; KO, 2015)
	Cobre	Aplainamento	Produtos biomédicos	(DUONG et al., 2013)
Cerâmicos	Silício	Disco Abrasivo; Litografia; Ataque químico	Trocador de Calor; MEMS; Células de combustível;	(PHILLIPS, 1989);(PAL; SATO, 2009);(DWIVEDI; GOPAL; AHMAD, 2000). (KAMITANI et al., 2011)
	Alumina	Disco Abrasivo	-	(ARAUJO, 2015)
	Quartzo	Laser	MEMS	(QIN; LI, 2002)
	Nitreto de Galio	Laser	LED	(NAKASHIMA; SUGIOKA; MIDORIKAWA, 2009)
	Foturan Vidro cerâmico fotoestruturado	Laser	Aparelhos microfluídicos 3D	(SERRANO et al., 2009)

Os trabalhos citados na Tab. 1 mostram quais processos de usinagem devem ser adotados para determinadas aplicações. Como um dos objetivos desse trabalho é a confecção de paredes finas para microtrocaadores de calor adota-se os materiais metálicos para esse fim.

Dos materiais disponíveis os selecionados foram: Alumínio 6061, Alumínio rapidamente solidificado (RSA) 6061 e cobre eletrolítico pois tais metais apresentam uma alta condutividade térmica necessária para o fim destinado.

2.1. Processos de fabricação e parâmetros

Como o objetivo é a formação de microparedes em diferentes métodos de fabricação separou-se a Tab.2 em processos de fabricação como fresamento de topo e tangencial, torneamento e corte por disco abrasivo. Ainda há também uma distinção quanto ao material usado em cada um dos artigos apontando também qual era o foco principal de cada um deles. Essa tabela foi montada na Tab.2 separando cada tópico relativo ao processo de usinagem.

A principal importância dessa separação é entender como cada um dos autores trabalhou com seu material em relação a parâmetros de corte e a relação material – processo de fabricação.

Como há uma grande quantidade de trocadores de calor metálicos usados em aparelhos eletrônicos podemos observar a Tab.2 como uma formadora de uma macro visão que proporcionou um quadro da fabricação de microparedes e microcanais. As referências contidas nela forneceram um entendimento dos principais mecanismos de corte em escala reduzida juntamente com os principais erros e os principais resultados obtidos.

Tabela 2 Artigos de referência separados tipos de fabricação e material na fabricação de microparedes e microcanais.

	Material	Parâmetros			Ferramenta		Objetivo	Autor
		a_p (um)	f_z (mm/min)	v_c (m/min)	Material	Diâmetro (mm)		
Fresamento Frontal /Fresamento de topo	Alumínio	150 a 500	100 a 300	23 a 55	WC	0,5	Influência da estratégia de corte na qualidade superficial.	(LLANOS et al., 2014)
		1 a 3	10 a 80	63	WC	1,0	Qualidade superficial em função dos parâmetros de corte na região de sulcamento.	(ZHAN et al., 2015)
		2 e 10	25 e 45,6	6,3 e 7,5	(Al Ti)N	0,2	Formação de rebarba e deformação lateral em função dos parâmetros de corte.	(VÁZQUEZ et al., 2011)
		4000	600 a 2100	500 a 900	WC	16,0	Validação de um modelo para produção de paredes finas em alta escala.	(ARNAUD et al., 2011)
	Cobre	500	500	100	WC	0,5	Qualidade superficial no escovamento para remoção de rebarba.	(MATHAI; MELKOTE, 2012)
		150 a 500	100 a 300	23 a 55	WC	0,5	Influência da estratégia de corte na qualidade superficial.	(LLANOS et al., 2014)
		20	15 a 45	50	PCD	0,5	Observação de todas as possíveis rebarbas e defeitos durante a usinagem.	(LIU et al., 2016)
		6 a 230	40 a 120	70 a 125	-	0,5 e 1,0	Sistema de tempo real de previsão da rugosidade	(BERUVIDES et al., 2016)

Continuação

	Material	Parâmetros			Ferramenta		Objetivo	Autor
		a_p (μm)	f_z (mm/min)	v_c (m/min)	Material	Diâmetro (mm)		
Fresamento Tangencial	Aço	500	235	9,4	Aço Rápido	40	Estudo da formação das rebarbas em função dos parâmetros de corte	(WAN et al., 2014)
	Cobre	4 a 13	48 a 240	600 a 900	PCD	6,0	Formação de rebarba e erro dimensional em função dos parâmetros de corte	(ZHONG et al., 2016)
		100 a 1000	23 a 75	30 a 120	Aço Rápido	40,0	Micro canais para microrreatores e células de combustível	(ZENG et al., 2012)
		950 a 1200	37 a 150	30 a 120	Aço rápido	40	Fabricação de Microcanais cruzados em planos opostos em função da profundidade de corte	(TANG et al., 2011)
		500 e 1000	25 a 75	8 a 100	Aço Rápido	40	Fabricação de Microcanais de forma simultânea com fresa de disco	(PAN; ZENG; TANG, 2009)

Continua

Conclusão								
	Material	Parâmetros			Ferramenta		Objetivo	Autor
		a_e (μm)	f (mm/rev)	v_c (m/min)	Diâmetro (mm)	Material		
Torneamento e Facimento	Cobre	-	-	-	80	Aço rápido	Fabricação de microtrocador de calor com paredes circulares.	(TANG et al., 2010)
		10	0,20	-	100	Diamante	Fabricação de microtrocadores de calor por torneamento de folhas de cobre	(PHILLIPS, 1989)
	Alumí	50 a 250	0,04	200	48	TiN	Fabricação de Rolo de laminação para replicação de textura	(JUNIOR, 2009)
	Aço	500	0,30	180	133	-	Sistema de compensação de erro radial para fabricação de paredes Circulares.	(STÖBENER; BEEKHUIS, 2013)
Corte Abrasivo	Material	Parâmetros			Ferramenta		Objetivo	Autor
		a_p (μm)	f (mm/min)	v_c (m/min)	Diâmetro (mm)	Material		
	Alum	1000 a 3000	60 a 300	500 a 1500	57	PCD	Avaliar os defeitos para produção de geradores de energia piezelétricos.	(ARAUJO, 2015)
		10	30	20.000 (RPM)	-	PCD	Fabricação de um guia de ondas com picos infravermelhos.	(CHENG et al., 2016)

Da Tab. 2 é possível observar que há uma grande quantidade de trabalhos feitos com fresamento de topo em relação aos outros processos de fabricação em materiais metálicos. Apesar disso, há também trabalhos feitos com fresamento tangencial, torneamento e corte por disco abrasivo.

Toda a revisão feita com fresamento de topo auxilia no entendimento de esforços, parâmetros de corte e interações entre ferramenta e peça de trabalho apesar de não terem sido fabricadas microparedes e microcanais com este tipo de processo.

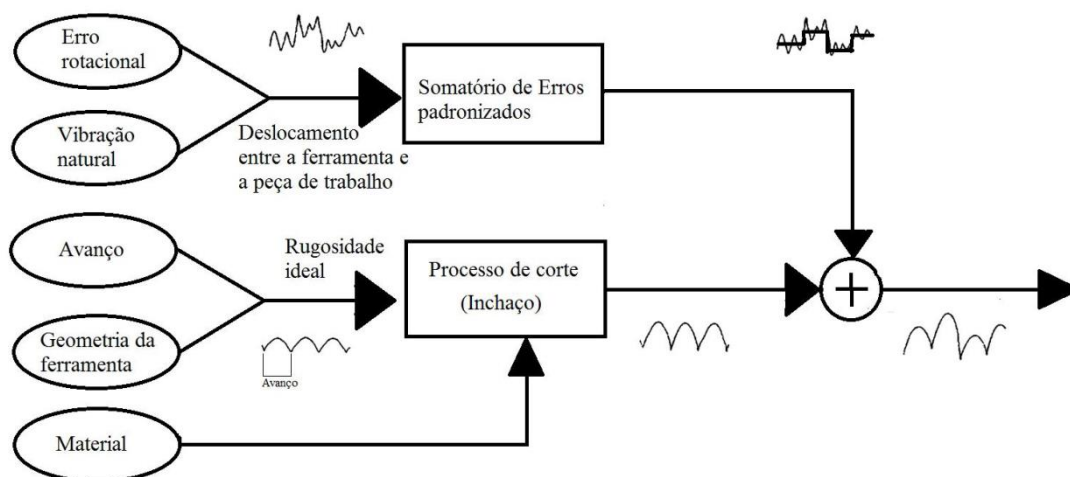
Dentre esses, o principal auxílio foi, quanto ao entendimento e controle da formação de rebarbas em todas as possíveis arestas formadas durante o processo de fabricação. Ainda assim podemos citar outros defeitos analisados.

Os principais defeitos observados após o microcorte são a formação de rebarbas durante a criação dos canais e a flexão de parede que são originadas por forças laterais que por sua vez são maximizadas pelo efeito de escala. A seguir, cada um desses defeitos foi aqui apresentado e discutido.

2.2. Defeitos da microfabricação

O entendimento desses defeitos possibilita entender como o se formará o perfil da superfície fabricada. Sata (1985) deixa bem claro quais são as principais fontes de perfis impressos em uma superfície usinada e podem ser observados segundo o seu diagrama na Fig.1.

Figura 1 Diagrama da formação da superfície da usinada de Sata (1985)



Fonte: Adaptado de Sata (1985).

Essa nova superfície gerada carrega consigo todos erros acumulados durante o processo de usinagem e dentre eles é importante setoriza-los em três partes.

A primeira descrita pelos dois primeiros balões da esquerda é a concentração dos erros vibracionais, que envolvem a dinâmica da máquina e de todos os esforços envolvidos, e os erros rotacionais, que envolvem o posicionamento da ferramenta em relação a superfície em cada ponte de movimento. Esses dois erros se soma e criam uma geometria imprevisível que será imposta sobre a superfície final.

A segunda é mais correlacionada com a geometria da peça e com os parâmetros impostos, dos quais pode-se fazer uma previsão da condição da superfície final prevista ou desejada. Essas interações são descritas da tal forma a se equacionar o perfil R_a de uma peça através da rotação, avanço e da aresta de corte da ferramenta.

A terceira é relacionada com o material da peça de corte e como este irá interagir com esforços que estão sendo desenvolvidos nele. Dependendo da magnitude, varia-se a resposta de uma recuperação elástica até uma deformação plástica.

Essas interações somadas geram a superfície final da peça e a compreensão dessas influi no controle das mesmas. Como a aplicação principal das microparedes é para microtrocaadores de calor, o controle da superfície é vital para que a mesma possa ter um rendimento maior.

Esse fato se dá, pois, uma superfície que tenha a funcionalidade térmica de troca de calor, pode não apresentar valor de acabamento que seja ideal do ponto de vista da usinagem da peça.

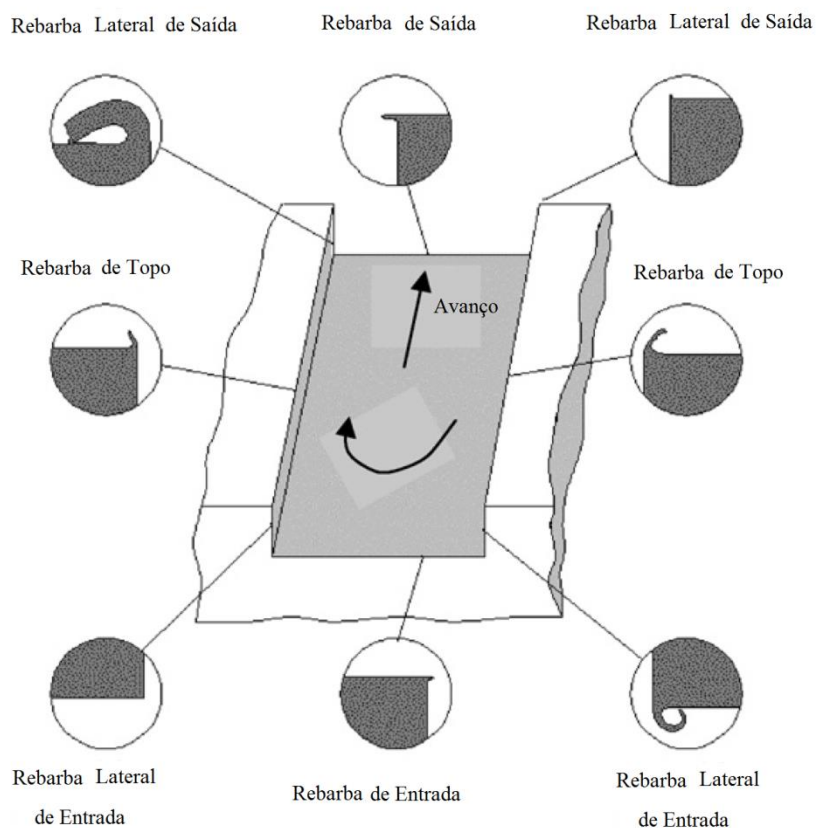
Um exemplo disso seria que trabalhos de fabricação que apresentam valores de rugosidade aritmética R_a entre valores de $5\mu m$ a $10\mu m$ estarem fora do campo ideal desejado para uma superfície depois de uma micro-usinagem, porém os valores de Skewness e Kurtosis da superfície (a definição e o entendimento desses valores se encontra em anexo) serem ideais para uma boa troca de calor pois haverá cavitação.

Sendo assim, é importante entender a interação desses fatores que geram o tipo de superfície para poder ser controlado e mapeado, fornecendo informações valiosas para o campo de térmico de trocas de calor em superfícies.

2.2.1. Formação de rebarbas.

A descrição das rebarbas encontradas na formação de canais ou paredes é dada por AURICH et al. (2009), os autores propõem a formação de cinco tipos de rebarbas descritas na Fig.2 as quais são: Lateral de saída; Lateral de entrada; de Topo; de Entrada e de Saída (fundo do canal). Essa proposta se dá para o fresamento de topo, porém para o fresamento tangencial o que pode ser visto é similar a essa proposta apenas mudando o ponto de vista do corte fazendo um giro de 90 para direita ou esquerda, de acordo com o corte concordante e discordante.

Figura 2 Tipos de rebarba para o fresamento de topo.



Fonte: Adaptado de Aurich et al. (2009)

A curva descrita no meio do canal serve para orientar o leitor em que lado estará sendo o corte concordante e o discordante. Na Fig. 2 o corte concordante se encontra na lateral esquerda enquanto o discordante se encontra na lateral direita.

Resumidamente, podemos então entender que para o corte tangencial, a rebarba lateral de saída maior (detalhe da Fig.2 no canto esquerdo superior) se torna a rebarba de fundo de canal de entrada ou de saída dependendo do corte ser concordante ou discordante

no último passe. Se o último passe for concordante, a maior rebarba fica no fundo de canal na saída e, se for discordante, no fundo de canal na entrada.

O processo de formação de rebarba também pode sofrer mudanças devido ao estado metalúrgico do material, sua formação depende da dureza do material. Quando o material é dúctil há uma tendência de formação de grandes rebarbas no topo da parede, pelo lado que a ferramenta termina o corte. Quando o material é mais duro, a formação de rebarba é atenuada em função do volume de material deformado para remoção.

Em seus estudos sobre a formação da rebarba em corte contínuo fica claro para Aurich et al. (2009) que as mesmas podem ser divididas em duas fases nas quais a primeira ocorre igualmente para materiais dúcteis e frágeis, descrita na Fig.3, e segunda fase é a que se diferencia para os diferentes substratos, descrita nas Fig.4 e 5.

- Primeira etapa está descrita na Fig.3.

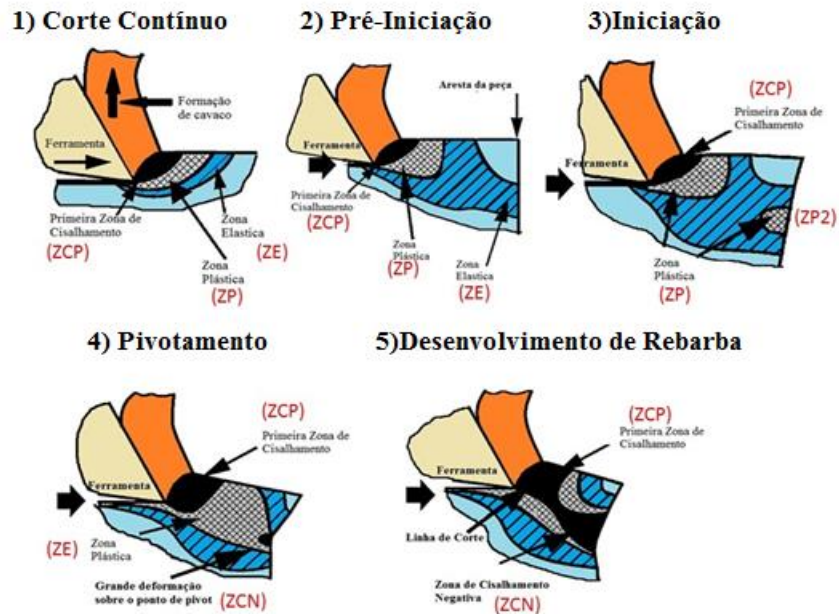
Inicialmente há o contato da aresta de corte com a peça criando três regiões que, a princípio, são ortogonais ao contato: a Zona de Cisalhamento Primária (ZCP); Zona Plástica (ZP); a Zona Elástica (ZE) descritas na parte 1 de Fig.3.

Essas três zonas permanecem constantes enquanto o corte é contínuo e a superfície do fim do material se mantém distante. A partir do momento em que a ZE se encontra com a superfície do fim do material, parte 2 da Fig.3, essa se deforma de tal modo a deixar uma protuberância na ponta da peça.

Após o início da deformação elástica aparece uma segunda Zona Plástica (ZP2), parte 3 da Fig.3, que será um ponto de apoio para a remoção do material ao final.

Essa ZP2 se converte em uma Zona de Cisalhamento Negativa (ZCN) que se conecta com a primeira zona plástica, criando assim a mesma graduação de tensões que havia no começo do corte, mas agora está descrita na aresta da peça. A continuação da remoção se dá na segunda etapa onde é diferenciada de acordo com o seu material.

Figura 3 Estágios de formação da rebarba independente do material



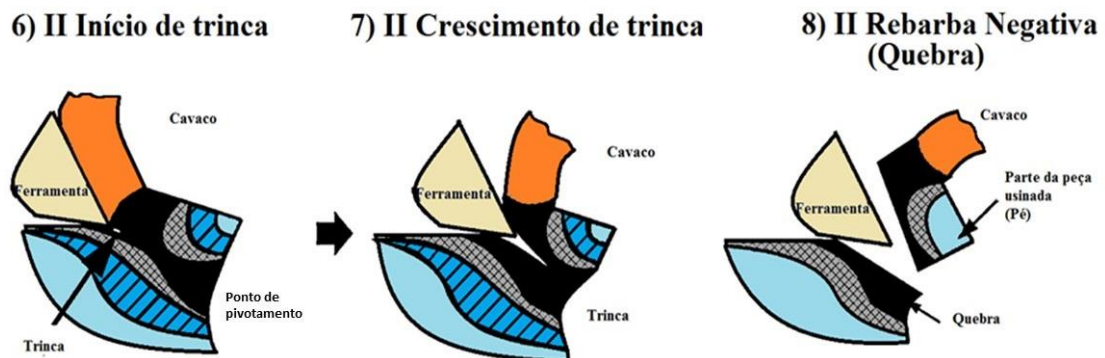
Fonte: Adaptado de Aurich et al. (2009)

- Segunda etapa: Frágil Fig.4

Na segunda etapa a formação da trinca também se inicia no contato da ferramenta com a ZCN, porém, como o material é frágil a trinca fica instável e cresce em direção ao ponto de pivotamento, parte 6 da Fig.4. A ZCP e a ZCN estão conectadas fazendo que a trinca cresça somente dentro dessa grande zona de deformada, parte 7 da Fig.4.

Quando a fratura se estende até o fim, parte 8 da Fig.4, o material da protuberância da peça é desconectado e peça fica então rompida. Essa rebarba criada é denotada Rebarba Negativa por Aurich et al. (2009).

Figura 4 Desenvolvimento da rebarba para materiais frágeis.



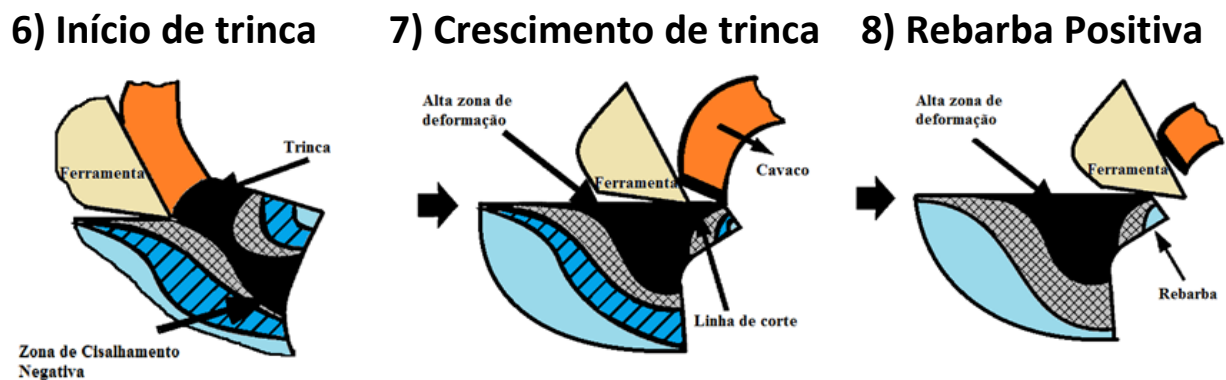
Fonte: Adaptado de Aurich et al. (2009)

- Segunda etapa: Dúctil. Fig.5

Inicia-se a trinca no contato da ferramenta com a ZCN. Essa segue a direção de corte do material, pois é uma trinca estável devido ao material ser dúctil. Com o avanço da ferramenta, a trinca se expande na direção de corte dentro da ZCP, parte 6 da Fig.5.

Com a continua movimentação da ZCP a protuberância que foi criada no material vai rotacionando em torno da ZCN que se estende devido ductilidade do material, parte 7 da Fig.5. Essa movimentação leva com ela a graduação das outras zonas, ZP e ZE, fazendo o material excedente retorcer e formar a rebarba, parte 8 da Fig.5. Essa rebarba é denominada rebarba positiva (AURICH et al., 2009).

Figura 5 Desenvolvimento da rebarba para materiais dúcteis.



Fonte: Adaptado de Aurich et al. (2009)

O conhecimento da formação da rebarbas ajudará na estruturação da peça para a mesma, de forma geométrica possa evitar a formação das mesmas fazendo assim não ser necessário o retrabalho da peça.

Essas zonas de cisalhamento podem variar de acordo com o tamanho médio de cada grão e este conseqüentemente também influi no tamanho da rebarba. Existe uma relação entre o tamanho de grão e a formação de rebarba, isto será tratado a seguir.

2.2.2. Tamanho de grão

Analisando outros defeitos que podem ocorrer durante a usinagem dos microcanais devemos analisar a influência do tamanho de grão também, pois o mesmo deve ser adequado para as condições de corte. Isso se dá, pois, os grãos do material interagem

diferentemente de acordo como seu tamanho em relação ao tamanho do raio de aresta da ferramenta. Sabe-se que o tamanho de grão tem relação direta com a ductilidade do material, quanto maior mais dúctil será sua resposta. Quando o tamanho de grão é reduzido, aumenta área de contorno de grão que irá impedir a movimentação de discordâncias e tornará o material mais duro.

Assis (2013) discute a influência do material na formação de rebarbas do ponto de vista do tamanho e geometria dos grãos. Em seu trabalho, trabalha com o aço COSAR 60 como recebido e o mesmo material com grão ultrafino. Variando o avanço por dente f_z mostra como a rebarba se desenvolve em relação ao raio da aresta da ferramenta. Ele explica que quando o f_z é menor que o raio de aresta, o efeito de escala se torna muito evidente gerando o efeito de sulcamento e aumento o tamanho das rebarbas.

Quando o corte ocorre no grão ultrafino as rebarbas aparecem apenas no momento onde a fresa, em um fresamento de topo, corta de forma concordante e mesmo assim de forma mais fina e estirada quando comparada ao material como recebido.

Aumentando-se o f_z para o tamanho do raio da aresta da ferramenta há uma notável melhora quanto ao tamanho da rebarba diminuindo a mesma quando se usa o material de grão ultra fino.

A principal explicação para a formação da rebarba ser maior em materiais com tamanho de grão maior se dá devido ao fato do mesmo possuir maiores tensões que proporcionarão maiores distâncias, sendo assim a ductilidade é diferente já que a mesma é função da área do tamanho de grão, um tamanho de grão maior torna o material mais dúctil. Lauro (2015) apresenta resultados relativos à usinagem aço com tamanhos de grãos diferentes. Os resultados apresentados mostraram que a força de corte é maior para grãos pequenos e em paralelo a energia específica de corte também é maior para o material de grãos menores.

Sendo assim há uma tendência a redução de rebarbas devido aos menores tamanhos de grão, porém haverá uma maior força de corte devido ao aumento da tenacidade do material e assim uma maior força lateral para flexão nesse tipo de material. Isso será de alto impacto para esse estudo, pois os objetivos do mesmo estão na formação de paredes com alta razão de aspecto, sem formação de rebarbas que são observáveis em grãos pequenos e

sem deformação lateral que envolve uma menor força na remoção do material, observado no material de grãos maiores. Por outro lado, Assis (2013) observou que o acabamento melhorou quando aço, com tamanho de grão menor foi usinado.

Analisando os defeitos de fabricação já citados de rebarbas e tamanho de grão e como estes interagem entre si fica um pouco mais claro o caminho que o trabalho deve seguir. Para evitar as rebarbas observando os tamanhos de grão é necessário trabalhar com tamanhos de grão menor.

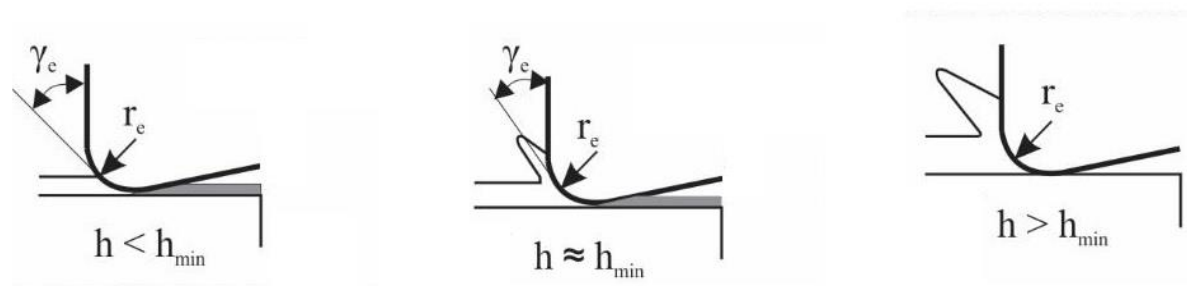
Nessa mesma linha de raciocínio, evitar os defeitos da microfabricação, os parâmetros de corte que foram estudados de forma que interajam com a peça de forma benéfica, diminuindo a força de corte para que não haja deformação. A interação dos parâmetros de corte com o tamanho de grão e raio de aresta gera o estudo do efeito de escala e este será analisado em cada detalhe na secção seguinte.

2.2.3. Efeito de escala.

Na macro-escala os parâmetros de corte formam uma seção de corte cuja espessura geralmente é muito maior que o raio de aresta da ferramenta. Na micro-usinagem, a dimensão da seção de corte se aproxima do valor do raio de aresta da ferramenta, permitindo que se observe alguns fenômenos envolvidos no microcorte.

O efeito de escala se dá quando a espessura de corte assume valores próximos ou inferiores ao raio de aresta, onde o raio de aresta passa a ter uma interação com o material e a frente da ferramenta, semelhantemente ao corte com ferramenta possuindo um ângulo de saída muito negativo. Isso se dá que quando a espessura de corte está próxima ao raio de aresta, o cavaco não é mais removido passando pela superfície de saída, diminuindo o ângulo de saída e até podendo torna-lo negativo. Em consequência da diminuição da espessura de corte o ângulo de cisalhamento diminui e área de cisalhamento aumenta, precisando de mais energia e mais força (RODRIGUES; JASINEVICIUS, 2017).

Figura 6 . Interação da frente da ferramenta com o material quando a espessura de corte h é pequena.



Fonte: Adaptado de Huo Cheng (2013)

Diminuindo-se a espessura de corte tornando-o menor que o raio de aresta, a ferramenta não consegue mais cortar o material e passa a apenas escoar sob a aresta e a superfície de folga da ferramenta, esse processo é conhecido sulcamento (*do inglês ploughing*). Nessas condições, o processo demanda uma força maior por volume pois não há remoção de material e este é empurrado para os lados escoando lateralmente, a energia específica de corte aumenta de tal modo que há mais energia sendo transmitida para peça em forma de calor e atrito do que em para a deformação.

Esse processo é danoso para a peça, pois não garante as qualidades finais desejadas segundo os parâmetros de corte. Sendo assim é importante saber quais são os parâmetros de corte que outros autores usam em seus processos de fabricação para se ter uma base comparativa. Essa relação se encontra na Tab.2 onde foram separados os processos de fabricação e materiais.

O efeito de escala está ligado com o processo de formação de rebarbas e com as forças laterais envolvidas durante o processo de fabricação das paredes. Durante o fresamento frontal ou tangencial o material removido não tem uma espessura constante variando sempre de uma espessura maior para uma menor ou oposto disso, dependendo se o corte é concordante ou discordante respectivamente.

De qualquer modo, o volume de material removido sempre passa por uma espessura que é denominada mínima em relação ao raio de ferramenta da aresta nesse momento acontece a deformação e o aumento de forças.

Se essa deformação é acumulada até uma aresta da peça ela se torna em uma rebarba que acumulará na saída da ferramenta. Além do fato que ao ser criada essa deformação, a mesma se acumula nos pontos de maior tensão que ao tentar ser removido pela próxima

aresta cortante resultará em uma força lateral nas paredes adjuntas. Caso a parede não tenha resistência suficiente a mesma deverá sofrer a deformação.

Há outras fontes de defeitos que ocorrem naturalmente quando se fabrica micro canais, dentre eles também é importante citar o Chatter que se designa como sendo a vibração auto excitada durante a remoção de material. Essa vibração, por não ser controlada, tende a contribuir de forma indesejada na peça, alterando valores de rugosidade como R_a .

Autores como Seguy, Dessein e Arnaud (2008) e Srinivasa e Shunmugam (2013) modelam sistemas para demonstrar como as forças atuam e assim diminuir chatter durante a fabricação de micro paredes enquanto Chern e Chang (2006) e Zhang et al. (2016) trabalham de forma inversa usando e criando vibrações controladas que auxiliem durante a usinagem. Através de atuadores, os autores fizeram que a peça vibrasse em frequências próximas as de corte do material fazendo que o material conseguisse diminuir a redução da espessura de corte durante o fresamento que acontece de forma circular.

Nesse estudo o Chatter não foi levado em conta devido à grande rigidez das ferramentas que conseguiram formar micro paredes, por isso não foi modelado um sistema para prever ou diminuir essa falha.

O critério de avaliação da qualidade foi padronizado de tal forma que conseguisse eliminar os defeitos apresentados e ainda possuir uma qualidade superficial que possa ser útil para a aplicação, que no caso era para microtrocaadores de calor devido à alta razão de aspecto.

Observado como os autores de referência trabalham em cada um dos processos de fabricação, com materiais diferentes e encontrando erros diferentes foi possível montar um caminho de fabricação de microparedes e microcanais através desse embasamento teórico.

Sendo assim para conseguir executar esse processo de fabricação, foi preciso descrever cada um dos processos, ferramentas, máquinas e instrumentos de medição que foram usados para conseguir atingir o objetivo da manufatura. A descrição de cada uma dessas partes se encontra no tópico de Materiais e Métodos.

3. Materiais e Métodos

Como o objetivo desse trabalho é entender e produzir todo o processo de formação de microparedes é importante descrever todas as máquinas, ferramentas, materiais e parâmetros de corte envolvidos no processo. Para isso serão estudados a influência das condições de usinagem para obtenção de microestruturas com relação entre espessura da parede e profundidade do canal, que define a razão de aspecto. Os processos que serão testados envolvem o fresamento tangencial usando fresa com espessura nominal de 200 micrometros, torneamento com uma pastilha de bedame de metal duro com largura da ponta de 500 micrometros e o processo de corte de disco abrasivo, que nos artigos científicos é conhecido como “dicing”, que usa um disco abrasivo com espessura de 254 micrometros.

Para isso diferentes máquinas e estratégias de corte serão avaliadas para se poder posteriormente realizar uma comparação entre os resultados de processo em termos de acabamento de integridade das microestruturas obtidas.

O material selecionado para usinagem é uma liga de alumínio e os experimentos visarão o seguinte: 1) produzir canais com o menor espaçamento possível, 2) avaliar o desempenho das condições de corte aplicadas a fabricação destes canais, 3) avaliar a influência relativa de cada processo na geração desses canais no âmbito de integridade das respectivas paredes que os separam (largura definida/ largura confeccionada), 4) avaliar a influência do processo no acabamento das superfícies geradas (fundo de canal e lateral de parede).

3.1. Máquinas Ferramenta

3.1.1. Torno de ultra precisão

Para os ensaios de sangramento de canais será usado um torno de ultraprecisão instalado no laboratório de Engenharia de Precisão do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP.

Tabela 3 Torno de Precisão da rank Pneumo ASG 2500 de 1991

Modelo	ASG 2500
Precisão nos eixos X e Z	1nm
Mancais	Hidroestáticos
Rotação Máxima	2000 rpm
Sistema de controle	Allen Bradley Series 8200

3.1.2. Máquina para corte de disco abrasivo

A máquina ferramenta usada para os ensaios de corte com disco Abrasivo é a “Automatic Dicing Saw DAD3350” fabricada pela empresa Japonesa DISCO alocada/pertencente à empresa CERAUTO da cidade de São Carlos.

A especificações da máquina estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 Especificações da Máquina Ferramenta Automatic Dicing Saw DAD3350 usada para os testes de corte com disco abrasivo

Especificações		Unid.	1,8kW	2,2kW
Tamanho da peça		-	$\phi 8''$ ($\square 250, \phi 300$ mm)	
Eixo X	Faixa de corte	mm	260	
	Vel. de corte	mm/s	0,1-600	
Eixo Y	Faixa de corte	mm	260	
	Passo Index.	μm	0, 1	
	Exatidão posicionamento	μm	0,2/260	
Eixo Z	Max. Stroke	mm	32,2	31,4
	Resol. Mov.	nm	50	
	Exat. Repeb.	μm	1	
Eixo árvore	Saída	kW	1,8	2,2
	Torque	N.m	0,29	0,7
	Faixa de Rot.	rpm	6.000-60.000	3.000-30.000
Dimensões da Máquina (LargxProf. xAltura)		mm	900 x 1.050 x 1.800	
Peso		kg	1.200	

3.1.3. Centro de Usinagem CNC Hermle 800

O centro de usinagem CNC Hermle 800 teve como objetivo fazer os ensaios de fresamento tangencial. A escolha se deu pela sua alta precisão nos eixos X e Y e uma variedade de velocidades do eixo árvore maior. As especificações do CNC são:

Tabela 5 Especificações da CNC Hermle 800 usada para os testes de fresamento tangencial.

<i>Velocidade máxima do eixo árvore</i>	<i>15.000 RPM</i>
<i>Mancais</i>	<i>Aerostáticos</i>
<i>Eixo árvore</i>	<i>Aerostático</i>
<i>Precisão X,Y e Z</i>	<i>1μm</i>
<i>Sistema de controle</i>	<i>Automático</i>

3.2. Material da peça

Os materiais da peça foram selecionados visando principalmente sua aplicabilidade em microtrocaadores de calor, por isso foram descartados os materiais poliméricos e cerâmicos.

Dos metálicos, as opções mais que mais se destacam para o mercado já existente são o cobre eletrolítico e as ligas de alumínio e essa preferência é balizada por dois parâmetros. O primeiro é a maleabilidade do alumínio, fabricado na extrusão e depois cortado para uso em computadores. O segundo é a condutibilidade térmica que assume altos valores para o cobre e relativamente altos para o alumínio também.

3.2.1. Liga de Alumínio

O material escolhido para fabricação dos canais é uma liga de alumínio RSA 6061 fabricada pela empresa holandesa RSP Technology. Esta é uma liga *Al Si0,6 Cu0,3 Mg1* (AA6061). O alumínio é um material com elevada condutividade térmica e uma aplicação importante em micro usinagem para este material não ferroso é a de microtrocaador de calor. A Tabela 6 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas desta liga.

Tabela 6 Dados das propriedades do material segundo a fabricante RSP technology.

Propriedades Físicas	Densidade (g/cm³)	02,70
	Expansão Térmica (10⁻³/K)	22,60
	Rigidez E-mod (GPa)	70,00
	Rigidez específica (GPa/g/cc)	26,00
	Condutividade térmica (W/m.K)	165,0
Propriedades Mecânicas	Resistência a Tração (MPa)	340,0
	Resistência ao escoamento (MPa)	315,0
	Alongamento (%)	16,00
	Dureza (HB)	110,0

Segundo a empresa fabricante dessa liga, a *RSP technology*, um dos diferenciais desse material com o convencional 6061 sem grão ultrafino é a qualidade da rugosidade final que pode ser até 50% melhor na usinagem com ferramentas diamantadas. Essas boas qualidades são derivadas do processo de fabricação *Meltspinning* que podem atingir taxas de resfriamento ultra rápidos chegando a faixa de 1 milhão de graus Cécius por segundo.

3.2.2. Cobre eletrolítico.

A escolha do cobre se dá pela elevada condutividade térmica e aplicação na área de microfluídicos. Além disso é um material de fácil usinabilidade. As propriedades desse material estão apresentadas na Tabela 7:

Tabela 7 Propriedades do material segundo o fabricante

Resistência a Tração (MPa)	250,0
Dureza (HB)	10,00
Condutividade Térmica (w/m.k)	385,0

3.3. Confecção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova que forma usados para todos os ensaios foram realizados em peças especialmente preparadas com a liga RSA 6061 através de torneamento com ferramenta de diamante. Posteriormente será relatado a respeito das peças confeccionadas em cobre eletrolítico.

A peça inicialmente foi faceada com a ferramenta de diamante para se obter uma superfície plana e com alto acabamento, na faixa dos 200nm, como apresentado pela Figura 7. O suporte para essas peças é feito de alumínio e tem uma base larga para a máquina consiga segurar com o sistema de fixação a vácuo. Na superfície de contato do suporte com a máquina há um furo de centro de 5mm para se colocar um pino guia no centro do apoio do spindle da Rank Pneumo ASG 2500.

Figura 7 Faceamento de peça no torno de ultra precisão Rank Pneumo ASG 2500



Fonte: O Autor

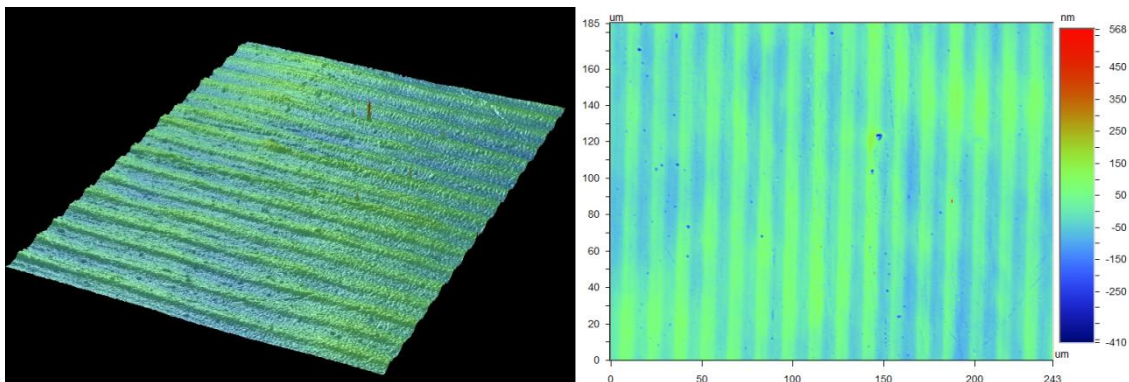
A operação de faceamento a peça realizada no torno de ultra precisão e foi realizada usando as seguintes condições de usinagem:

Tabela 8 Parâmetros usados para formação da superfície dos copos de prova com alto grau de acabamento

Rotação	1.000 RPM
Avanço	15,0 m/min
Profundidade de usinagem	20 μm
Ferramenta	Diamante monocristalino
Raio de ponta	1,54 mm
Ângulo de saída	0°
Ângulo de Folga	12°
Raio de aresta	70 nm
Fluído de corte	Quimatec 2- para alumínio
Temperatura ambiente	21°C

O acabamento da peça foi medido no perfilômetro Wyko NT1100 para se determinar a rugosidade da superfície usinada após esse faceamento, como apresentado na Figura 8. A rugosidade obtida no processo foi de $R_a = 32,74 \text{ nm}$.

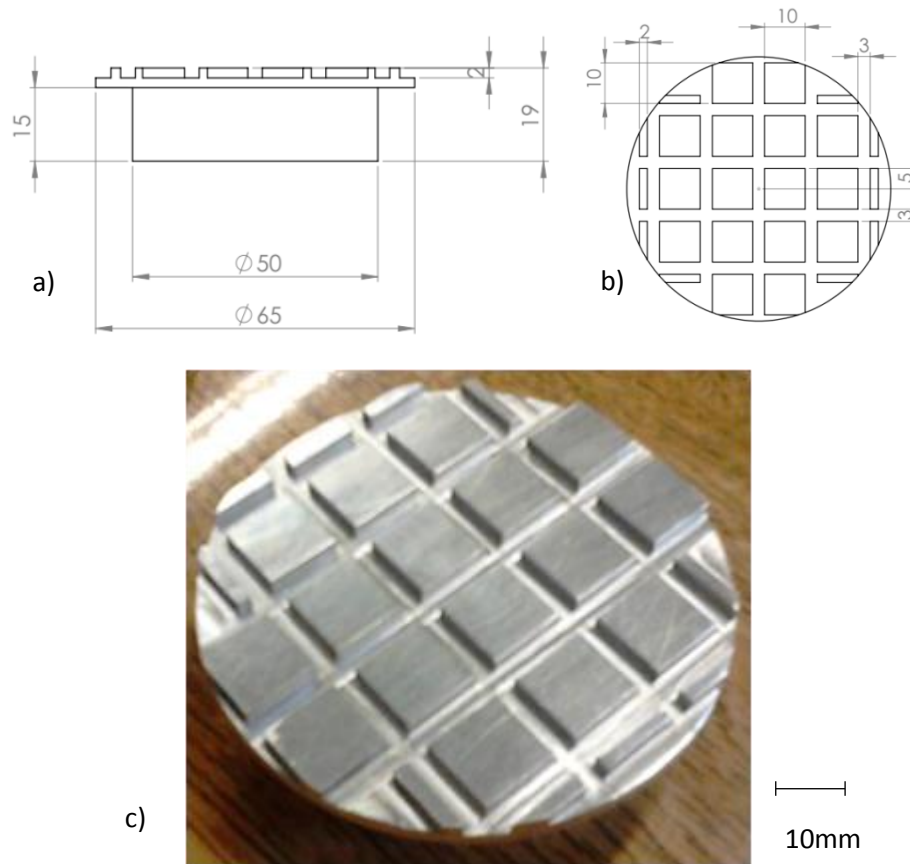
Figura 8 Imagem do Perfilômetro mostrando rugosidade da peça



Fonte: O Autor

Os corpos de prova, que foram utilizados para os ensaios de fabricação das microparedes através do processo de fresamento tangencial com fresa de disco, foram faceados no torno de ultraprecisão e então feitos os retângulos que receberam as microparedes conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 Peça de ensaio do tipo esquadrejada; a) vista lateral; b) vista superior; c) foto em perfil



A Figura 9 a) apresenta um desenho esquemático da peça projetada para os ensaios. Cada “quadrado” será usado para realizar testes de fabricação dos canais. Os canais feitos para separar essas zonas quadradas foram usinados com uma fresa de $\varnothing 3\text{mm}$ e profundidade de 2mm , fresa de topo reto. Rotação usada foi de 1150 RPM determinando uma velocidade de corte $v_c = 10,5\text{ m/min}$. A usinagem foi auxiliada com fluido de corte durante o processo na furadeira de coordenadas Perrin. Na etapa seguinte a peça retornou ao torno de ultra precisão Rank Pneumo ASG 2500 para se retirar as rebarbas do processo de macro fresamento.

A peça acabada apresenta dezesseis regiões de $10 \times 10\text{ mm}^2$ (Fig.9b). Em cada um dessas zonas foram realizados testes de corte e posteriormente foram avaliados os seguintes aspectos:

- a) Espessura das paredes em relação a sua altura buscando a maior razão de aspecto;
- b) Rugosidade no fundo dos canais;

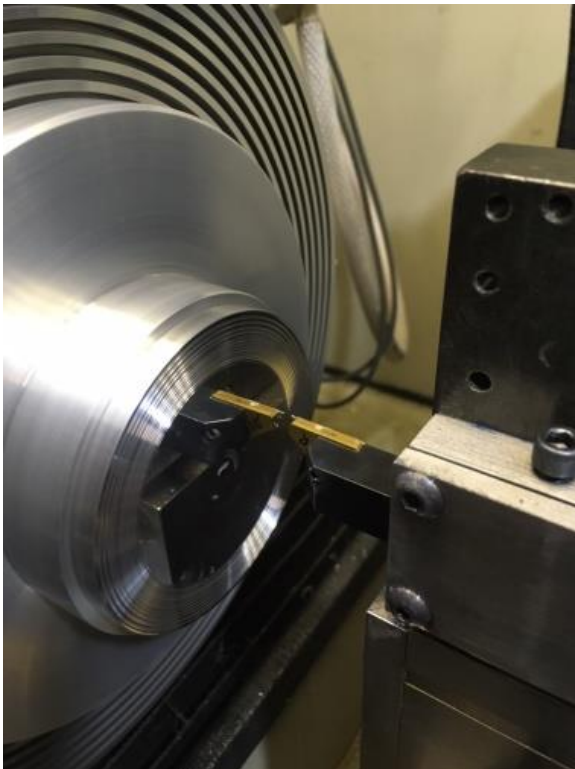
c) Avaliação de danos e/ou defeitos como de rebarbas na base dos canais assim como no topo das paredes em função do tipo de corte aplicado com as fresas de disco, i.e.: concordante e discordante.

Pode-se observar através da Fig. 9 b) e 9 c) que nas regiões externas há pequenas áreas com formas irregulares com $2mm$ de largura. Estas porções serão eventualmente usadas para fabricação de canais com objetivo de fazer a avaliação da rugosidade formada nas superfícies das paredes usinadas. No total serão feitos 6 ensaios para essa análise em cada peça.

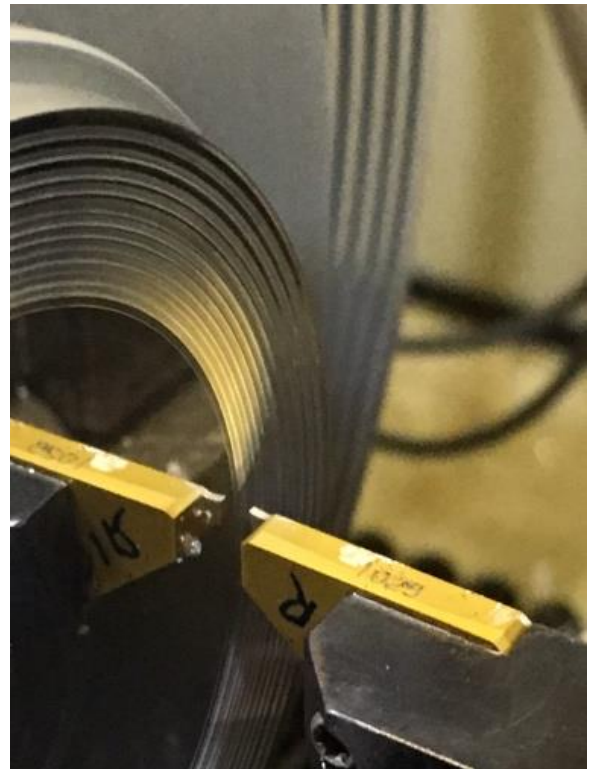
Os ensaios de fabricação de canais usando uma ferramenta de bastilha de bedame em um torno de ultraprecisão fez uso do corpo de prova usinado conforme mostrado na Figura 9.

Neste ensaio foram feitas 3 baterias de canais com variação na distância entre eles de forma a gerar paredes com espessuras constantes e foi sendo reduzida esta distância entre os canais partindo de $150\ \mu m$ até o valor de $50\ \mu m$ de espaçamento entre as baterias de canais como mostrado esquematicamente na Fig.10 a) e 10b).

Figura 10 a) Procedimento de corte de canais usando ferramenta do tipo bedame; b) detalhe do corte os canais formados.



a)



b)

3.4. Instrumentos de medição

Após os ensaios de usinagem os canais gerados deverão passar por avaliação visando obter informações acerca da integridade dos canais, o acabamento na base do canal e a avaliação dos danos gerados pelo corte baseado no tipo de processo/ferramenta/máquina. A seguir estão descritos os principais equipamentos que serão usados para avaliação dos resultados do corte.

3.4.1. Perfilômetro Óptico

Para as medidas de rugosidade, foi usado um perfilômetro óptico da Marca WYKO/Digital modelo NT1100. Este instrumento tem resolução vertical de 0,1 nm e faz a medição do acabamento e do estado da superfície com auxílio de gráficos e imagens 3D. As características desse equipamento, WYKO NT 1100, são:

Alcance de Medida vertical:	0,1 nm a 1 mm;
Resolução vertical	0,1 nm
Refletividade:	1% - 100%
Objetivas:	5x, 20x e 50x
Lentes de campo de visão:	0,5 x, 0,75x, 1x e 2,0x
Software: Vision	4.2

3.4.2. Perfilômetro Confocal

Microscópio confocal OLS 4100 LEXT da Olympus. Este perfilômetro permite a medição de acabamento, dos perfis 3D dos canais e da microgeometria da ferramenta. Algumas das especificações podem ser listadas:

Medida de rugosidade:	200nm, mínima;
Medida de perfil:	120nm, mínima;
Lentes de campo de visão:	5X, 10X, 20X e 50X;
Software:	LEXT.

3.4.3. Microscópio Eletrônico de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura é uma das formas que nos permite observar e caracterizar a integridade de materiais heterogêneos orgânicos e inorgânicos, e superfícies numa escala local.

Neste tipo de instrumento a área a ser examinada ou o micro - volume a ser analisado é irradiado com um feixe de elétrons focado numa área específica, o qual pode ser estático ou em movimento rápido através da superfície do espécime. O Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V.) é um dos instrumentos mais versáteis para a avaliação e análise das características micro-estruturais de objetos sólidos.

Neste trabalho o M.E.V. auxiliou na caracterização das superfícies usinadas e na avaliação dos danos induzidos pelo corte nas paredes dos canais provenientes dos processos de usinagem aplicados. Portanto, o M.E.V. foi usado para observar suas dimensões, morfologias e defeitos gerados pelo corte. Não foi necessário fazer a metalização das amostras.

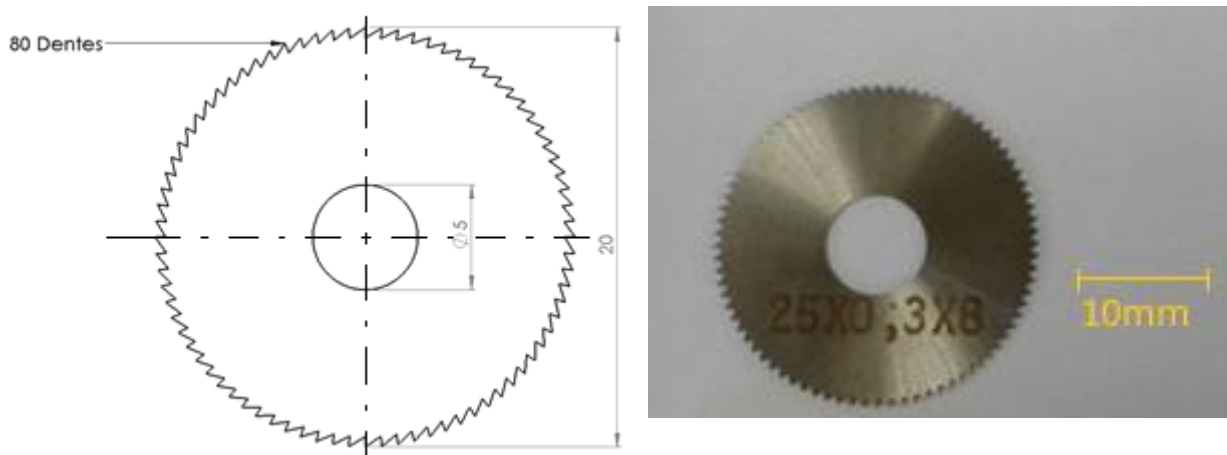
3.5. Ferramentas

3.5.1. Fresa de disco

Para o processo de fresamento tangencial foi selecionado uma fresa de disco fabricado pela ADES em aço M2-HSS e dureza 63-65 HRC.

Para a fabricação das microparedes é necessário saber qual o raio de aresta para se ajustar os parâmetros de corte. Para medição do raio de aresta foram feitas imagens no confocal mostrando as superfícies de saída e de folga, e o de perfil para se montar o raio de aresta. O valor médio do raio de aresta medido na fresa de disco foi de 15,53 micrometros. De acordo com o fabricante, a fresa deve trabalhar com pelo menos três dentes estejam engajados no corte. A Figura 11 apresenta um desenho esquemático da fresa de disco usada no fresamento tangencial dos canais.

Figura 11 Disco de fresamento tangencial.

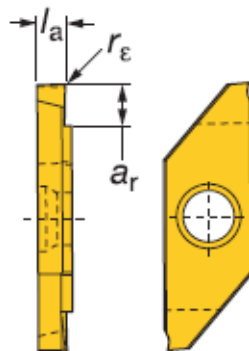


Fonte: O Autor

3.5.2. Pastilha de bedame

A pastilha de bedame usada para os ensaios de sangramento foi fornecida pela SANDVIK® apropriada para usinar alumínio e suas ligas em condições de micro usinagem. O código do fabricante para esta pastilha é MAGR/L 3 050 que é usada na classe N, metais não ferrosos, de metal duro com cobertura de PVD. Um esquema simplificado pode ser visto na Figura 12. A Tabela 9 mostra as especificações da pastilha de bedame.

Figura 12 Desenho esquemático da pastilha de bedame SANDVIK.



Fonte: Catálogo SANDVIK® (data)

Onde:

l_a é a largura da aresta de corte do bedame.

r_e é o raio de ponta.

a_r é a profundidade máxima.

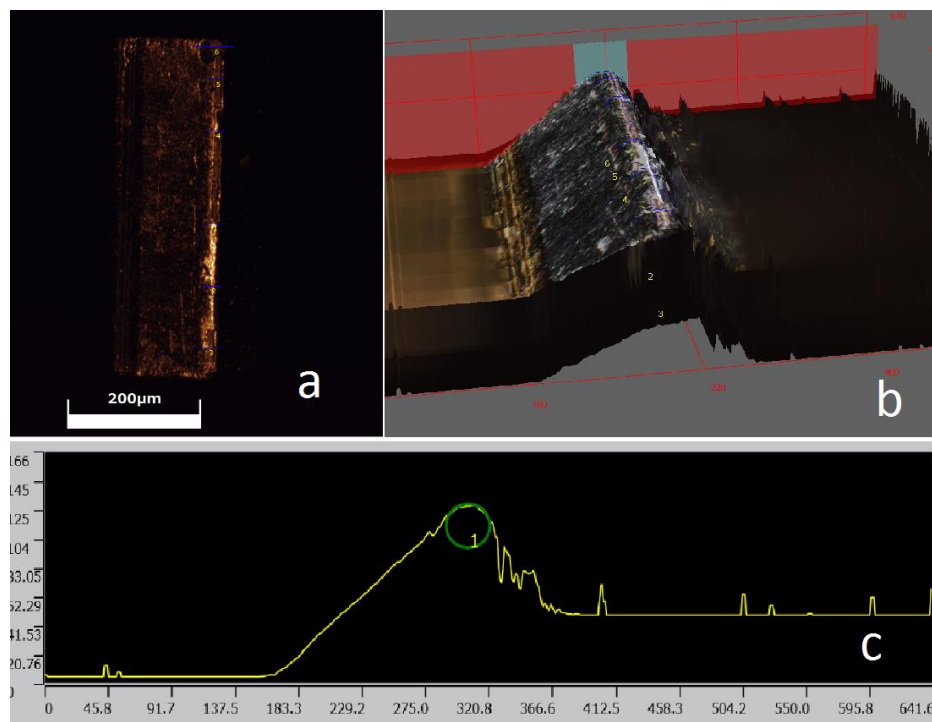
Tabela 9 Características geométricas da fresa

Nome	Tamanho do inserto (mm).	l_a (mm)	a_r (mm)	r_ϵ (mm)
MAGR/L	3,0	0,5	1,3	0,05

O inserto foi inspecionado através do perfilômetro confocal Olympus Lext para avaliação do raio de aresta e condição da aresta de corte. A Figura 13 apresenta as imagens da aresta do bedame obtidas através de perfilometria (Fig. 13 a) e 13b).

A medida do raio de aresta é feita pelo software de forma a encaixar, geometricamente, o maior círculo que contenha todo o perfil do raio conforme mostrado na Fig.13c). Fazendo várias medidas nessas em lugares diferentes é possível determinar um valor de raio médio de aresta, dado na Tab.10.

Figura 13 a) Superfície da aresta de corte do bedame com amplificação de 20x ; b) Vista tridimensional da mesma aresta; c) Corte em uma determinada posição para analisar o perfil do raio de aresta.



Fonte: O Autor

Tabela 10 Dados de raio de aresta medidos pelo microscópio confocal

Identificação	Número de medidas	Raio médio(μm)	σ (μm)	2σ (μm)
1	6	19,552	6,246	12,492
2	5	16,907	1,557	3,114
3	5	12,732	4,364	8,728
4	5	18,929	2,379	4,758

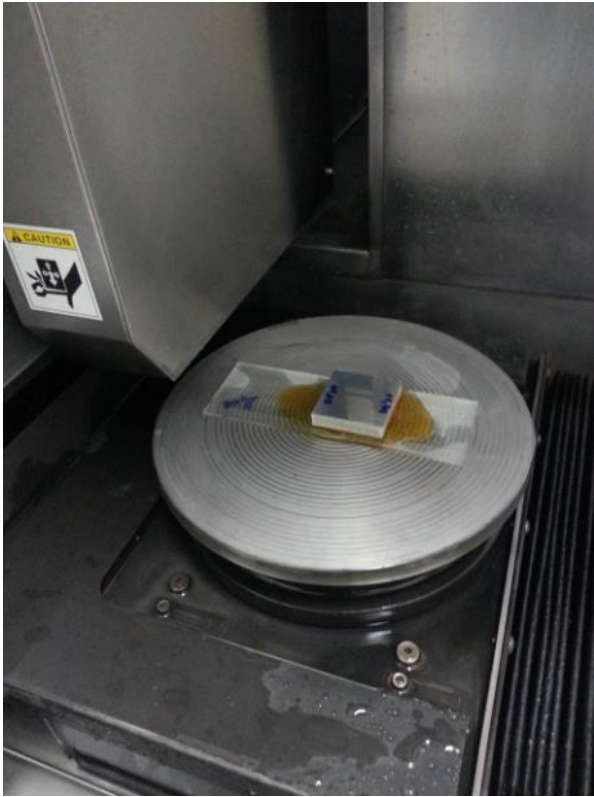
3.5.3. Discos abrasivos.

O disco de corte usado é o Thermocarbon (2.25M-10C-54R7-3) com espessura de $0,256 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. O diâmetro externo é de $57,15 \text{ mm}$ com tamanho médio de grão de 50 micrometros , aderidos com resina polimérica e concentração de 270 a 325 grãos por cm^2 .

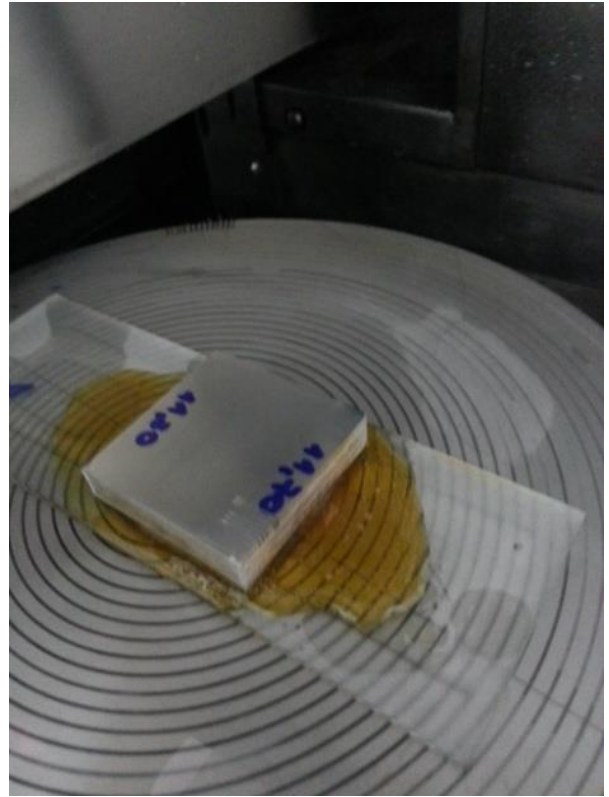
Foram realizadas 8 baterias de corte partindo-se de profundidade de $1,5 \text{ mm}$ e deixando uma parede com $0,5 \text{ mm}$, chegando-se a 4 mm de profundidade para uma espessura de parede de $0,1 \text{ mm}$. As três últimas baterias de testes e o canal foram de uma extremidade a outra da peça com objetivo de cruzar os canais e observar as colunas deixadas pela intersecção entre as paredes dos canais. A velocidade de avanço do disco sobre a peça foi de 1 mm/segundo e a rotação foi de 30.000 rpm .

A montagem feita para o corte na aresta superior com o disco abrasivo faz uso de um bloco de vidro plano que é aderido à base da máquina usando uma cola preparada a base de cera de abelha, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 Montagem feita para os cortes com disco abrasivo na Máquina de corte com disco abrasivo, A) vista geral da montagem e; b) detalhe da montagem da peça sobre a mesa da máquina.



a)



b)

4. Resultados e discussões.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos segundo os três Processos usados para usinagem de canais visando a obtenção de paredes finas nos corpos de prova. Inicialmente, serão avaliados os resultados de acabamento do fundo dos canais usando como parâmetros de rugosidade da área S_a assim como parâmetros geométricos da superfície como S_{ku} e S_{sk} em função das condições de corte aplicadas para o fresamento tangencial com fresa de disco e por disco abrasivo. Para isso também foram feitas medições quanto aos parâmetros de rugosidade e parâmetros ligados a geometria superficial em função da taxa de remoção de material, do avanço e do material da peça.

4.1. Fresamento tangencial.

A Figura 15 apresenta o desenho esquemático com o mapa das posições no corpo de prova onde cada uma das condições de usinagem apresentadas na Tabela 11 são respectivamente aplicadas.

A ferramenta é a fresa de disco de 20 mm de diâmetro 80 dentes e 200 μ m de espessura, as paredes são projetadas para serem de 800 μ m de altura, 150 μ m de espessura e de 10 mm de comprimento retangulares. Em todos os testes foi usado fluido lubrificante/refrigerante.

As condições de corte destacadas na Figura 15 apresentam um asterisco são aquelas de onde serão obtidos os valores de rugosidade S_{ar} , S_{sk} , S_{ku} para a lateral da parede, pois seria impossível obter esse resultado nos ensaios onde foram usinados os pequenos blocos inteiros. Para cada uma dessas condições foi avaliado o acabamento no fundo do canal.

O objetivo aqui é observar a variação da rugosidade e também qual o estado da superfície em termos de formação picos e vales. Deve-se ressaltar que para uma aplicação como, p.e., microtrocaadores de calor, os defeitos na superfície, sejam eles: rebarbas, vales ou picos, os resultados em termos da turbulência gerada no fluido que passa por estes canais poderão ter resultados direto na eficiência do trocador. Os valores de rugosidade tanto de fundo de canal como de lateral de parede foram medidos buscando-se os seguintes parâmetros:

- a) Rugosidades medidas foram S_a , Média aritmética de picos de vales;
- b) S_{sk} , Valor Skewness relativo a predominância de picos ou vales, e;
- c) S_{ku} , Valor Kurtosis relativo a quão agudos ou suaves são esses picos ou vales.

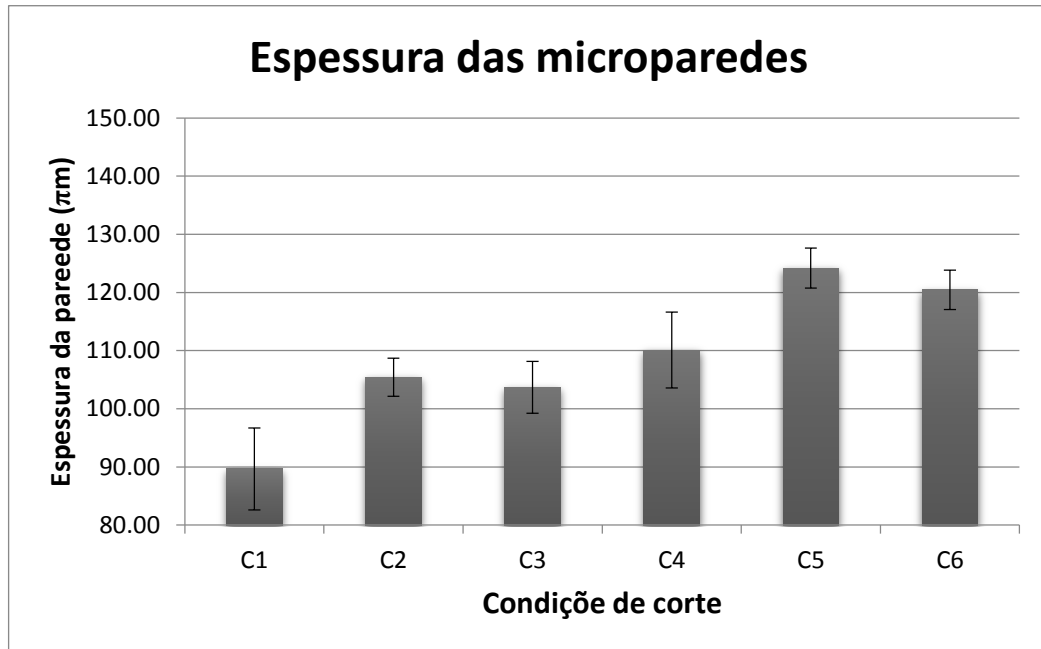
Da mesma forma as áreas quadradas determinadas na Figura 15 referem-se às regiões onde foram usinados os canais de acordo com as condições mostradas na Tab. 11. Em cada quadrado pode-se usinar 28 canais com 200 μm de largura e, portanto, gerar 29 paredes com 150 μm de espessura e os canais. A disposição dessas paredes tem o objetivo de atender o projeto de microtrocaadores de calor. Cada um dos quadrados tem 10 x 10 x 3 mm.

A pós as usinagens foram realizadas as medidas da espessura das paredes deixadas pelo corte. Os resultados obtidos nessa figura se deram através de cinco medições ao longo da parede em dois setores da base onde se encontram todas as paredes.

Os resultados estão apresentados na Figura 16 mostra a variação da espessura das paredes sob cada condição de usinagem ao longo dos 10 mm de largura de cada “platô”. É interessante observar que nas condições onde a taxa de remoção é maior o valor da espessura da parede se aproxima do valor nominal proposto em projeto, ou seja 150 μm , porém não chegam a atingir este valor. Possivelmente, esta diferença deva-se ao mecanismo de remoção de material uma vez que o fz usando em todas as condições geraram uma remoção muito pequena de material e o principal mecanismo atuando neste processo seria o sulcamento (do inglês “polughing”). Isto se coloca, pois como fz é muito pequeno e o raio da aresta de corte dos dentes das fresas muito pequeno, como descrito por Pan et al. (2009).

Nos estudos de Lauro (2015) também é notado que para ambos os materiais tratados com tamanho de grão pequeno e grande o aumento da velocidade de corte gera uma redução da força de corte.

Figura 16 Comportamento da espessura da parede de acordo com as condições da Tab. 11



Fonte: O Autor

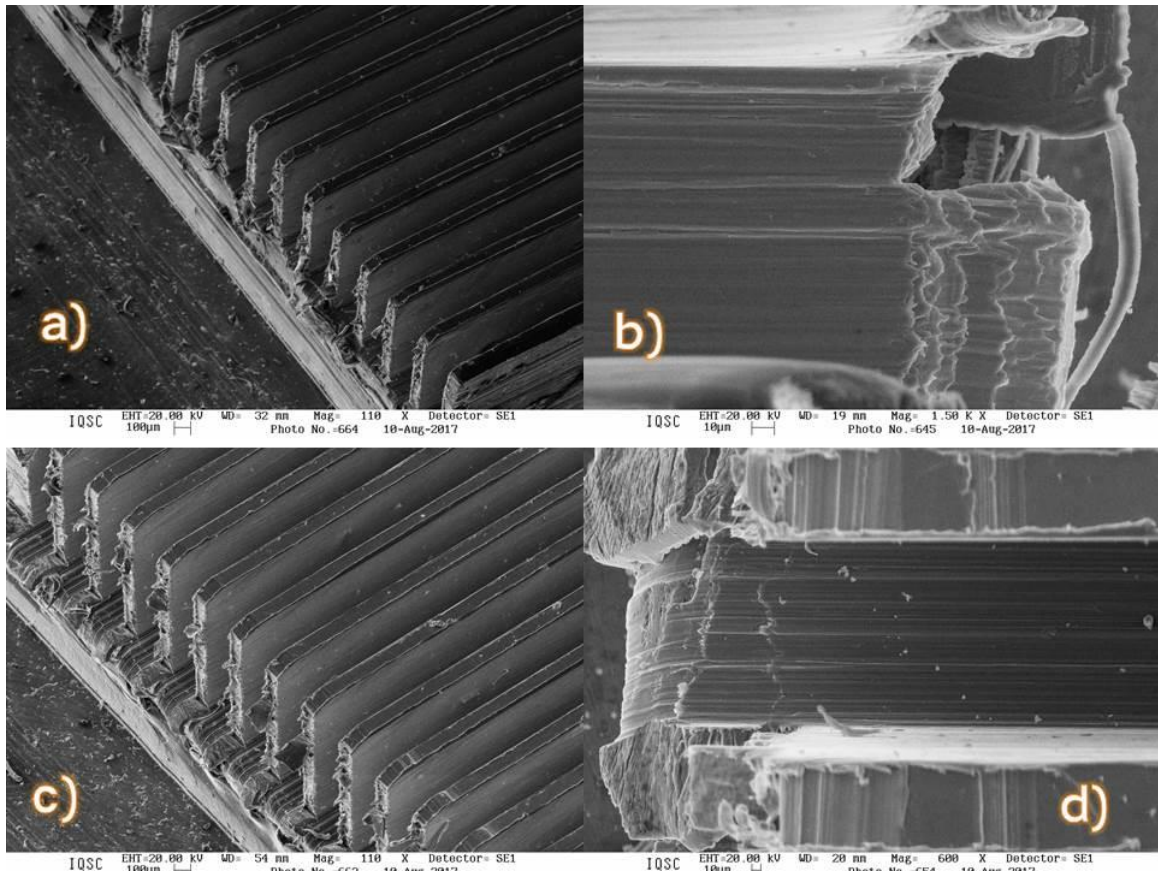
A Figura 17 apresenta imagens feitas através de microscopia eletrônica de Varredura (MEV) de duas condições de corte para corte de canais, i.e., C1 e C6. Pode-se observar que em ambos os casos as paredes formadas apresentam-se integras e sem sinais de deflexão após o corte, a despeito do fato de suas espessuras sofrerem variações em função dos valores das condições de corte.

Com relação à a formação de rebarbas desse processo no alumínio pode-se observar através das Figuras 17 b) e 17 d) que houve formação de rebarbas na saída do canal e nas bordas da parede como seria esperando em função das baixas espessuras nominais de corte, o que faria com que o material acumulasse à frente da ferramenta e fosse empurrado para fora do canal na saída ferramenta. No entanto, é importante ressaltar que no topo das paredes não se observou acúmulo de material formando rebarbas como se observa no corte com micro fresas de topo, como observado no trabalho de Assis, 2013.

Uma forma proposta na literatura para evitar a formação de rebarba na saída do canal seria criar uma seção com inclinação de forma que não houvesse material a ser acumulado e pivotado à frente da ferramenta. Com o canto arredondado esse acúmulo de material à frente da ferramenta na saída do canal seria progressivamente removido não

deixando que se formasse rebarba. Isto será tratado em um item mais à frente.

Figura 17 a) Entrada de canal para condição C1; b) Rebarba de saída para condição C1; c) Saída de canal para condição C6; Rebarba de saída para condição C6. Condições dadas segundo a tabela 11

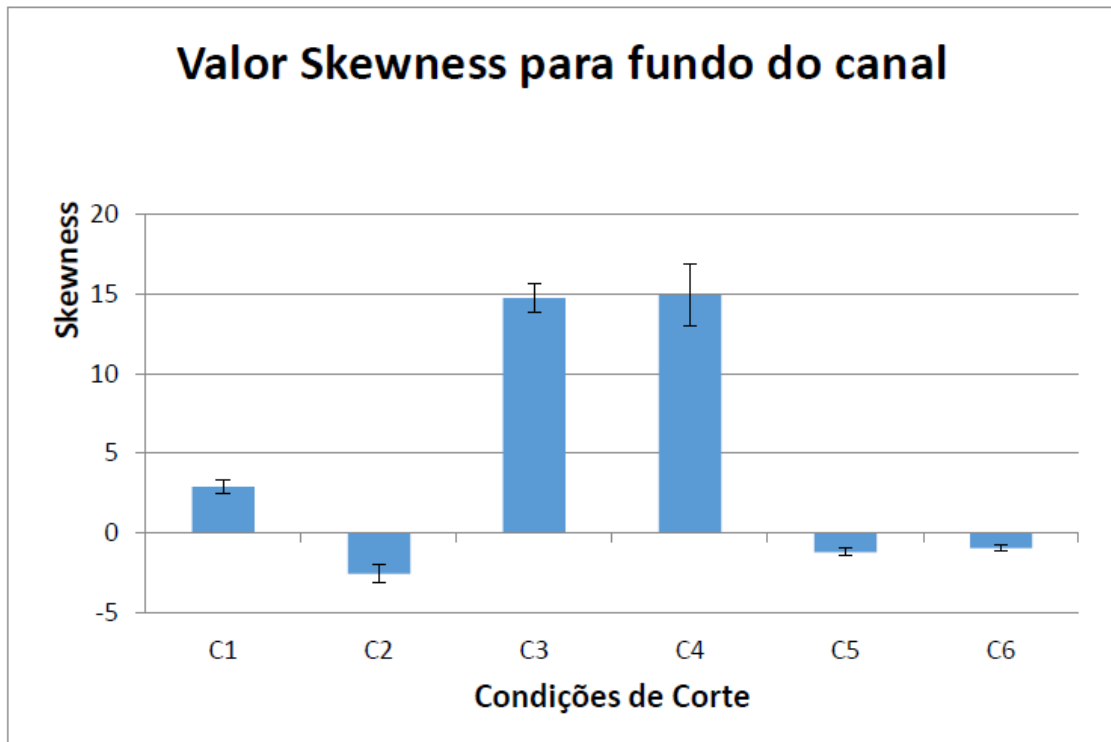


Fonte: O Autor

4.1.1. Análise do Acabamento dos Canais e das Paredes

A análise do estado da superfície dos canais e das paredes serão agora avaliados. A Figura 18 apresenta os valores de Skewness dos canais para as 6 condições propostas. Pode-se Observando o perfil das rugosidades de fundo de canal podemos saber se há predominância de picos ou vales através do valor S_{sk} através da Fig.18.

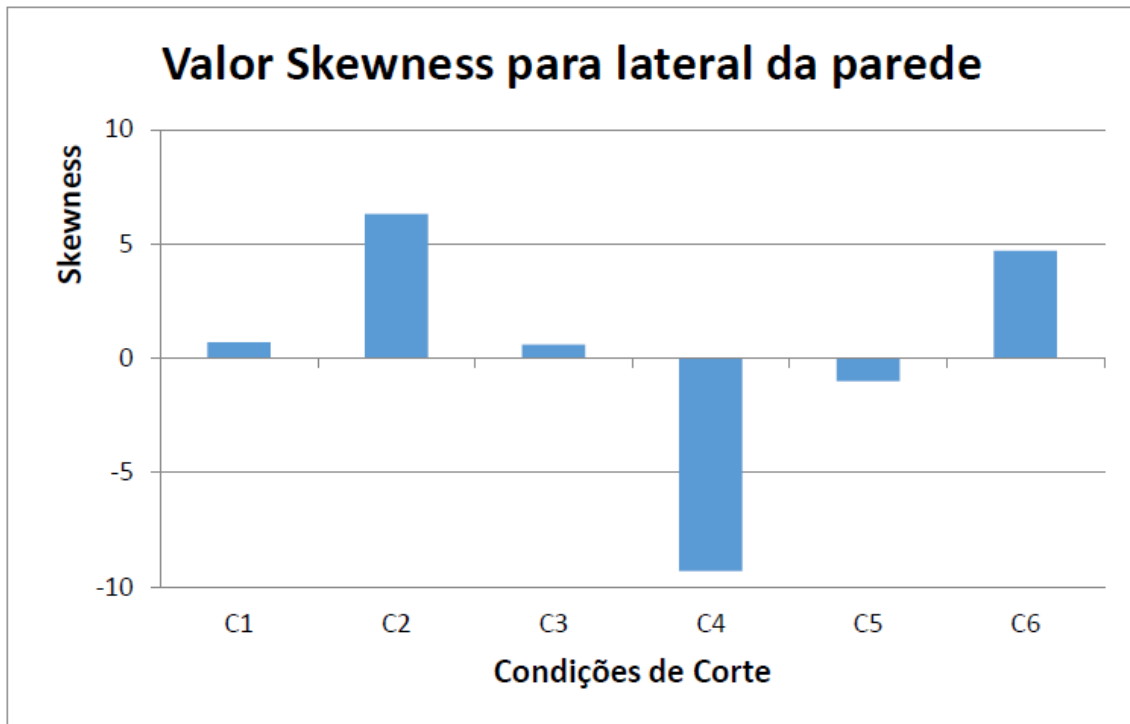
Figura 18 Comportamento do valor Skewness no fundo de canal para as condições da tabela 11



Fonte: O Autor

Pode-se observar que não há uma tendência quanto ao aumento ou diminuição das condições em relação ao a formação de picos, $S_{sk} > 0$, ou vales, $S_{sk} < 0$. Porém também é importante observar esses dados em paralelo ao valor skewness da lateral da parede, que também deveriam apresentar similaridades. Essas similaridades podem ser justificadas devido ao fato que a superfície do fundo do canal e a lateral da parede são formados ao mesmo tempo no mesmo processo de remoção de material. Esses dados estão contidos na Fig.19.

Figura 19 Comportamento do valor Skewness na lateral do canal para as condições da Tab.11



Fonte: O Autor

O valor S_{sk} para a lateral da parede não apresenta uma barra de variância como mostrado na Fig.18. Isso se dá pois só possível fazer um ensaio para cada condição contida na Tabela 11. Apesar desse problema na quantidade de ensaios, a medição na lateral da parede foi feita em uma área 5 vezes maior do que do fundo de canal.

Uma pequena área era usada para cada medida de rugosidade para cada fundo de canal medido. Como houve a formação de vários canais foi preciso obter cinco imagens para se ter uma noção de todos os canais. Para cada imagem, três medidas foram feitas, cada uma em um canal diferente em cada imagem obtida formando um total de 15 medidas para a análise de fundo de canal.

Como havia apenas uma parede para ser analisada, foi feita apenas uma medida nessa parede. Porém, para tentar equilibrar o espaço amostral medido, a área lateral da parede medida era aproximadamente dez vezes maior que a medida de cada pequena área medida no fundo de canal..

Dos valores Skewness retirados da Fig. 19 podemos observar que, de forma parecida com os valores de S_{sk} para o fundo de canal, os valores não apresentaram um padrão.

Apesar dessa falta de tendência, ou padrão esperado, a fabricação de trocadores de

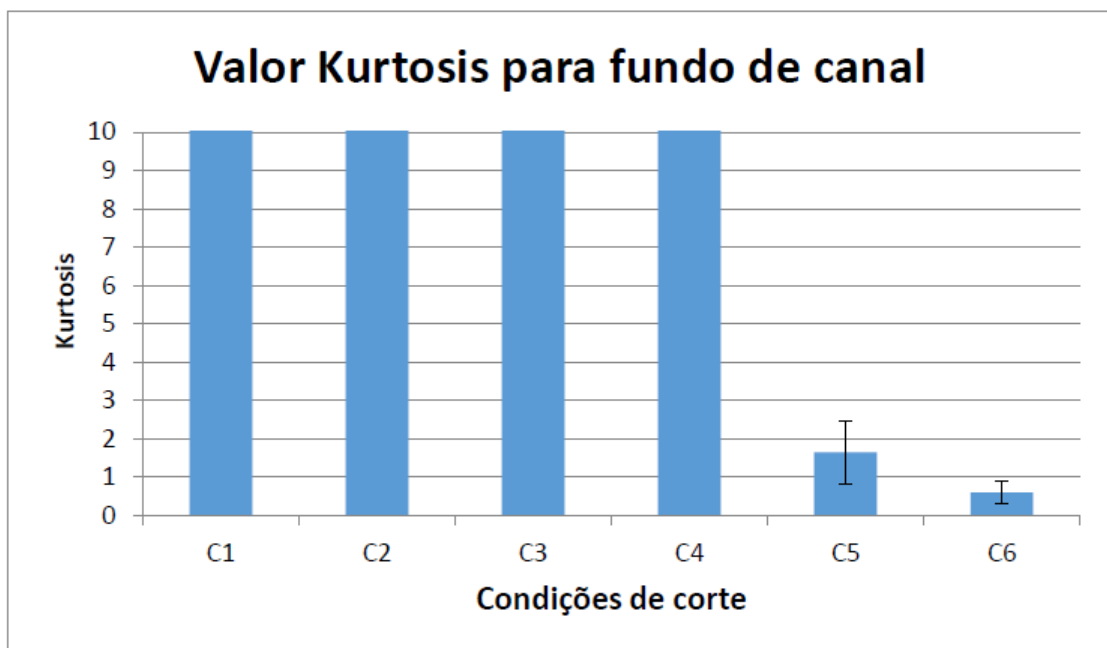
calor usará esses resultados para designar qual o melhor valor Skewness segundo a necessidade para cada uma das superfícies usinadas.

As figuras 18 e 19 mostram que os resultado não apresentam um padrão, sendo assim eles apresentam uma combinação de possibilidades, como por exemplo, para pico/pico (C1 ou C3), pico/vale (C4), vale/vale (C5) e vale/pico (C2 ou C6) para o fundo de canal/lateral da parede respectivamente. Resumidamente poderíamos observar da seguinte forma, para o controle específico de cada uma das superfícies usinadas poderíamos ter:

- Predominância de Picos tanto para Fundo de canal quanto para a lateral da parede. Para isso bastaria usar as condições de corte C1 ou C3;
- Predominância de Picos para o fundo de canal e o inverso para a lateral da parede. Para bastaria usar os parâmetros contidos na condição C4;
- Predominância de Vales no fundo de canal e o inverso na lateral da parede. Para isso bastaria usar os parâmetros da condição C5;
- Predominância de Vales para o fundo de canal e para a lateral da parede poderiam ser usados as condições C2 ou C6.

Passando a análise agora para como é perfil desses picos ou vales descritos nas Fig. 18 e 19 teremos os valores de S_{ku} para fundo de canal descrito na Fig.20 e depois para lateral de parede Fig.21 fazendo a mesma comparação.

Figura 20 Comportamento do valor Kurosis para o fundo de canal. Imagem ampliada para o valor de kurtosis igual a 3.



Fonte: O Autor

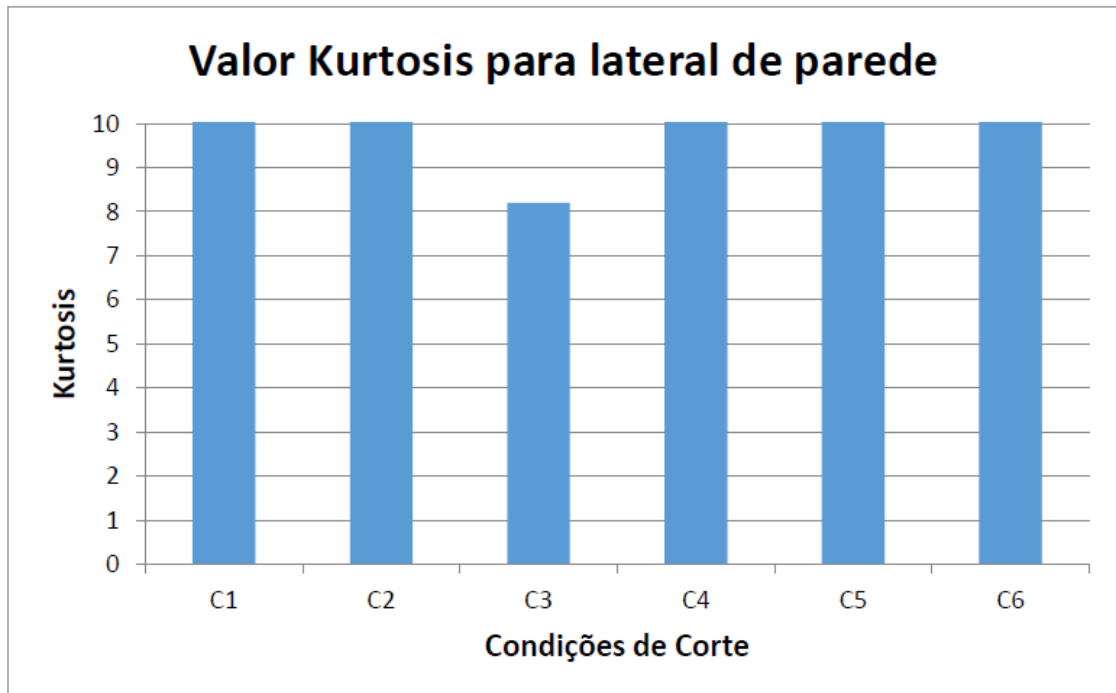
Os gráficos de valores Kurtosis 20 e 21 aparecem cortados em alguns pontos pois seus valores deram maiores que 10. Como o valor que muda a superfície estudada é 3, a apresentação dos valores integrais redundaria em uma difícil compreensão do gráfico em torno do ponto principal de mudança superficial, 3.

Da Fig. 20 é possível observar que para parâmetros de corte, de C1 a C4, não apresentam barra de variância no gráfico. Estes dados possuem a barra de variação, porém, como estavam longe do valor 3 não se fez tão útil para essa análise dos resultados já que o valor que define o ponto de viragem é para Kurtosis 3. A superfície tem uma resposta de geometria mais aguda, $S_{ku} \geq 3$, tanto para a formação de picos no fundo de canal, condição C3 e C4 da Tab.11, tanto quanto para vales no fundo de canal, condição C1 e C2. Esses valores podem estar correlacionados com o modo que o material é retirado havendo um alongamento do material até que mesmo se rompa devido as tensões sofridas. Essa afirmação é proposta devido à alta ductilidade do material, fazendo que o mesmo tenda sempre a se deformar antes de cortar.

Já nas condições de maior velocidade de corte, C5 e C6, o fundo de canal mostra apenas a formação de picos porém mais suavizados, $S_{ku} < 3$. Sendo assim os valores de Kurtosis de C5 e C6 Não tem o mesmo alongamento do material proposto, RSA 6061, como nos ensaios C1, C2, C3 e C4, porém, agora propondo um corte mais suave, com menos alongamentos e mais rupturas.

Na figura 21 observa-se a falta de padrão comparada com os mesmos valores para o fundo de canal. Isso porque em todos os ensaios, C1 a C6, o valor de kurtosis detectou a formação apenas de picos ou vales são agudos e nenhum deles suaves.

Figura 21 Comportamento da Rugosidade Kurtosis para a lateral da parede. Imagem ampliada para o valor de Kurtosis 3.



Fonte: O Autor

Analogamente com os resultados para fundo de canal e lateral de parede para os valores Skewness a falta de padrão gera uma possibilidade de combinação. Essas combinações de resultados podem ser sendo agudos/agudos (C1, C2, C3 e C4), suaves/agudos (C5 e C6) para fundo de canal e parede lateral respectivamente.

4.1.2. Análise dos esforços de corte durante a usinagem

Neste estudo não foram medidas as forças de corte, porém é possível estimar os valores baseado nas equações propostas na Literatura. De acordo com o modelo de formação de cavaco mostrado na Figura 22, a espessura de corte varia no corte concordante de um valor máximo até o valor mínimo formando o ângulo de contato do dente da fresa com o material.

O ângulo de contato pode ser estimado através da seguinte relação geométrica:

$$\cos \psi_0 = \frac{\frac{D}{2} - ae}{\frac{D}{2}} = 1 - \frac{2 \times ae}{D} \quad (1)$$

Onde:

ψ_0 é o ângulo de contato

D é o diâmetro da fresa (mm);

ae é a profundidade radial de corte

Assim podemos estimar que o ângulo de contato durante a usinagem foi de 11,48°.

Para o cálculo da máquina espessura de corte usamos a seguinte relação:

$$h_{max} = f_z \times \text{sen } \psi_0 = 2 \times f_z \times \sqrt{\frac{ae}{D} - \left(\frac{ae}{D}\right)^2} \quad (2)$$

A Tabela 12 apresenta os valores das espessuras de corte máximas para o corte com a fresa de disco.

Figura 22 Desenho esquemático do contato da ferramenta com a peça para formação do cavaco em fresamento tangencial

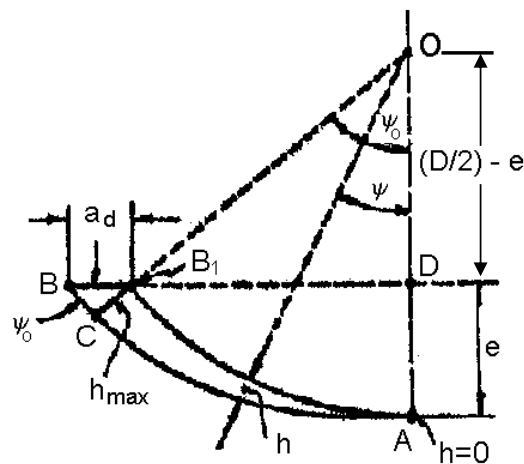


Tabela 12 Estimativa das espessuras máximas de corte para cada condição

Condição	f_z (mm)	h_{max} (nm)
C1	0,0004	80
C2	0,0002	40
C3	0,0005	100
C4	0,0004	80
C5	0,0004	80
C6	0,0005	100

Para estimativa das forças de corte máxima pode-se usar a seguinte equação:

$$F_c = K_{s1} \times b \times h_{max}^{1-z} = K_{s1} \times b \times \left(\frac{v_f}{n \times Z}\right)^{1-z} (\sin \psi_0)^{1-z} \quad (3)$$

De acordo com Dib et al.(2014), o valor de Ks para a liga RSA 6061 é dado por:

$$K_s = \frac{364}{h^{0,27}} \quad (4)$$

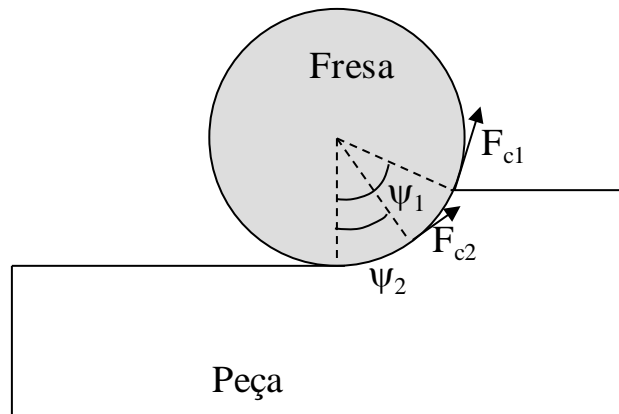
Portanto podemos estimar os valores de Força de corte para os testes. Os valores estimados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 Estimativa de força de corte através de Kienzle a partir dos dados de corte.

Condição	fz (mm)	h_{max} (nm)	Fc (mN)
C1	0,0004	80	14,89
C2	0,0002	40	9,00
C3	0,0005	100	17,42
C4	0,0004	80	14,80
C5	0,0004	80	14,80
C6	0,0005	100	17,42

Os valores de força de corte estimados são muito pequenos individualmente. No entanto, pelas condições de corte aplicadas é possível estimar o momento de torção que é imposto à fresa durante o corte. O perfil da interação da ferramenta durante a usinagem dos canais pode ser esquematicamente idealizado pela Figura 23.

Figura 23 Modelo esquemático da interação dos dentes da fresa durante o corte e os esforços gerados.



O momento de torção poderia ser estimado em função da força gerada por cada dente da fresa engajado durante o corte, ou seja, $M_t = f(F_c, Z_i)$. Portanto,

$$M_t = \sum F_{ci}(D/2) \quad (5)$$

Supondo 2 dentes apenas, como está representado na Figura 23, teríamos:

$$M_{t_{\max}} = (F_{c1} + F_{c2}) \cdot (D/2) \quad (6)$$

Assim entendemos que as forças geradas seriam:

$$F_{c1} = k_{s1} \times b \times h^{1-z} = K_{s1} \times b \times (f_z \times \sin \psi_1)^{1-z} \quad (7)$$

$$F_{c2} = k_{s1} \times b \times h^{1-z} = K_{s1} \times b \times (f_z \times \sin \psi_2)^{1-z} \quad (8)$$

Considerando que $\Psi_1 = \Psi_0$, então

$$\Psi_2 = \Psi_0 - (360/Z) \quad (9)$$

A fresa usada nos testes possui 80 dentes. Portanto, um (01) dente a cada $4,5^\circ$. Dessa forma, teríamos ao longo do comprimento de contato para profundidade de usinagem de 0,2 mm e $\Psi_0 = 11,48^\circ$, apenas 2 dentes trabalhando, $\Psi_1 = 4,5^\circ$ e $\Psi_2 = 9^\circ$. Para uma largura de corte equivalente a espessura da fresa, ou seja, $b = 0,2$ mm e $K_{s1} = 364$ kf/mm², os valores de torque total durante o corte são apresentados na Tabela 14.

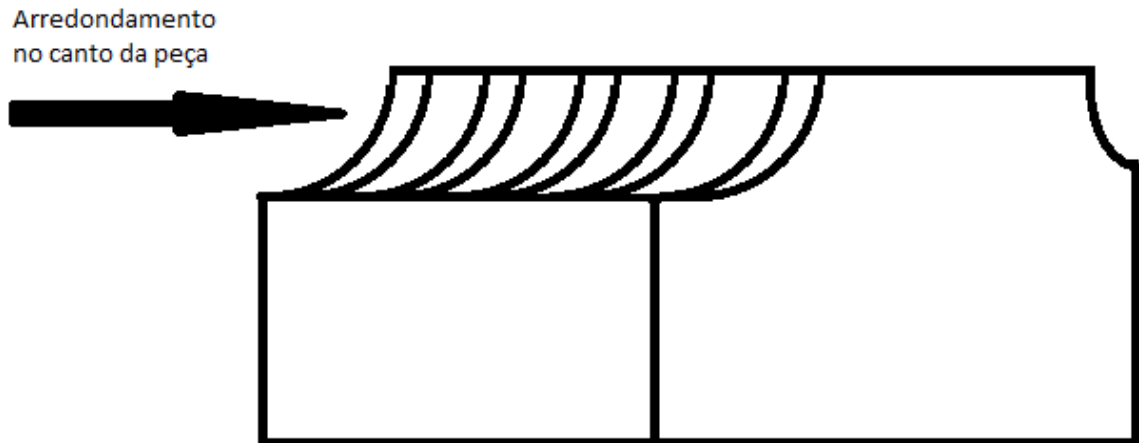
Tabela 14 Momento de Torção imposto à fresa de disco estimado através da equação (6).

Condição	$h_1 = fz \cdot \text{sen} \Psi_1$ (mm)	$h_2 = fz \cdot \text{sen} \Psi_2$ (mm)	F_{c1} (mN)	F_{c2} (mN)	Mt (N. m)
C1	0,000515933	0,000853803	0,03756	0,062157	0,000997
C2	0,000311058	0,000514761	0,022645	0,037475	0,000601
C3	0,000607208	0,001004851	0,044205	0,073153	0,001174
C4	0,000515933	0,000853803	0,03756	0,062157	0,000997
C5	0,000515933	0,000853803	0,03756	0,062157	0,000997
C6	0,000607208	0,001004851	0,044205	0,073153	0,001174

4.1.3. Remoção das rebarbas na saída dos canais

Como apresentado anteriormente, na saída da ferramenta dos canais formavam rebarbas que se prendia às paredes e no fundo do canal. Devido à suas dimensões e posição torna-se muito difícil sua remoção *a posteriore*. Em função disso foi proposto uma forma de recorte das áreas destinadas ao corte dos canais. A proposta se baseia em criar uma seção com um arredondamento de forma que, quando a ferramenta estiver saindo do canal ela encontre uma seção com redução de altura como está esquematicamente representado na Figura 24. Com essa variação na inclinação da estrutura prismática deixada por uma ferramenta com ponta arredondada, esperava-se que o problema da rebarba poderia ser resolvido. Uma série de ensaios onde se manteve a velocidade de corte em $v_c = 150$ m/min e o avanço variável de acordo com que está representado na Tabela 15.

Figura 24 Representação esquemática da peça para os ensaios descritos na Tab.12



Fonte: O autor

Tabela 15 Condições de corte para detecção do máximo avanço com fluido de corte.

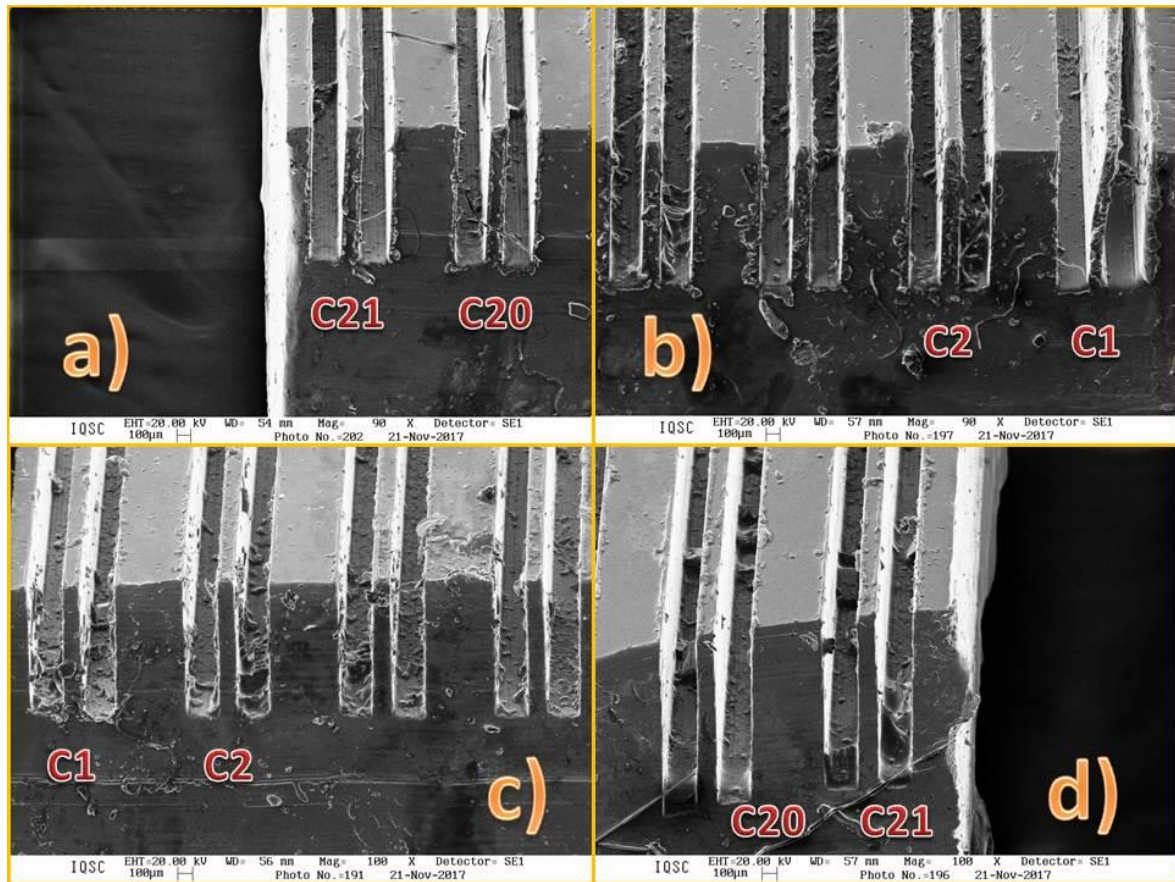
Condição de Corte	Velocidade de corte (m/min)	Vel. de Avanço (m/min)	Profundidade por passe (μm)
C1	200	100	200
C2		125	
...		...	
C20		600	
C21		625	

Para primeira condição testada, denominada de C1 na Tab. 15 equivalem ao dobro das condições de corte C1 da Tab.11. A velocidade de corte e o avanço foram dobrados para se manter o volume de material removido, enquanto a profundidade de usinagem $a_p = 0,2$ mm foram mantidas constantes. Esperava-se que isso poderia permitir a melhoria global em termos de mitigação da formação de rebarbas no topo das paredes e na saída da ferramenta, como observado na Figura 17, evitando-se a formação da rebarba na extremidade da saída da ferramenta através de um mecanismo que denominamos de ponto de pivotamento

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos na entrada e na saída da ferramenta

para algumas das condições descritas na Tabela 15.

Figura 25 a) e b) Entrada da ferramenta; c) e d) Saída da ferramenta para as condições descritas na tabela 15.



Fonte: O Autor

As Figuras 25 c) e d) apresentam as primeiras e as últimas condições de usinagem aplicadas. Pode-se observar que nas condições de corte, de C1 a C21, não foram constatados os problemas de rebarba nas paredes dos canais usinados em decorrência da nova geometria circular contida no canto da parede. Quanto a deformação da parede, os ensaios pararam na condição C21 pois foi nessa condição que a peça deformou.

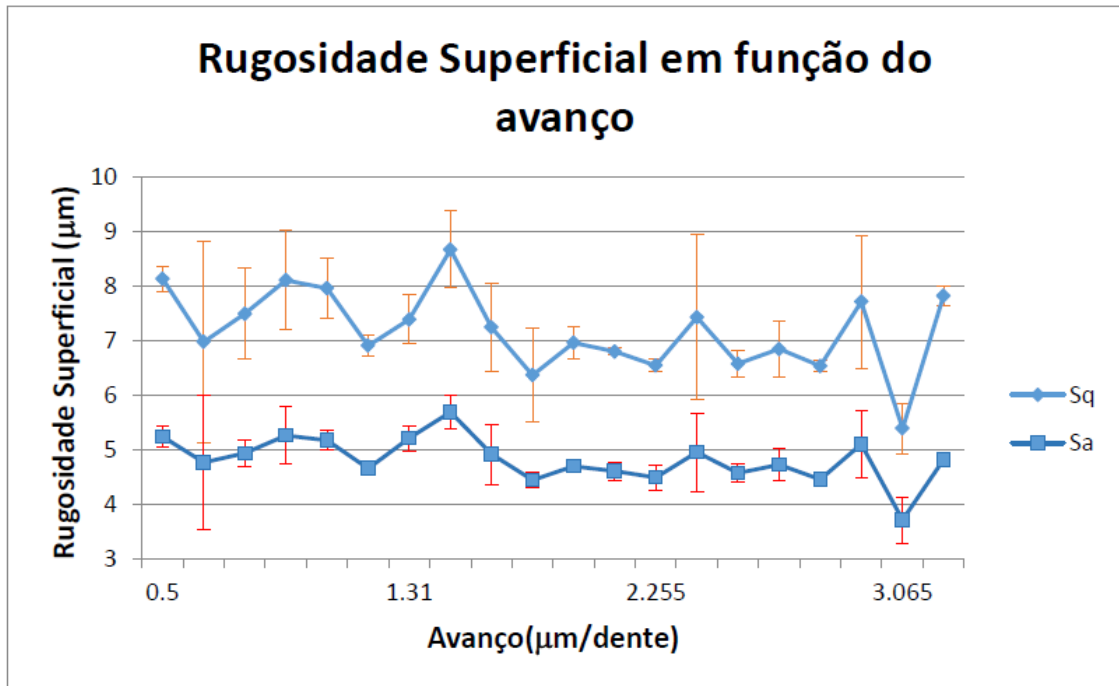
Outro fator importante foi que o avanço por dente passa de $f_z = 0,5 \mu\text{m}/\text{dente}$ em C1 para $f_z = 3,2 \mu\text{m}/\text{dente}$ em C21 sendo que a taxa de remoção de material passou de $4 \text{ mm}^3/\text{min}$ em C1 para $25,6 \text{ mm}^3/\text{min}$ em C21. Nesses ensaios o uso de fluido de corte auxiliou a usinagem de tal forma a conseguir avanços maiores.

As condições de corte mais baixas, onde os avanços são menores, geraram mais rebarbas pois estavam na faixa onde acontece o sulcamento no fundo do canal, em função do raio de aresta ser maior ou igual ao avanço por dente. Isso pode ser observado na Fig.25 onde o aumento da condição gera uma melhora no acabamento em relação a formação de

rebarbas nas laterais de saída das paredes.

A rugosidade desses canais também foram estimadas e estão apresentadas na Figura 26. Os valores das condições de corte usadas se encontram na Tabela 15.

Figura 26 Comportamento da Rugosidade S_q e S_a em relação ao avanço por dente.

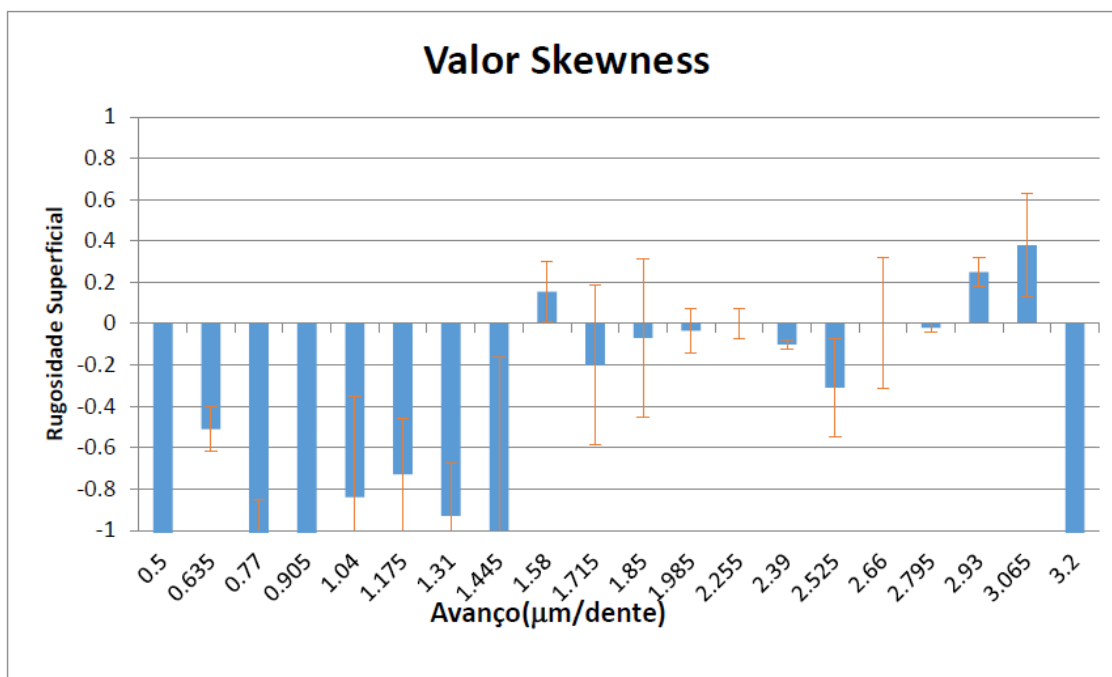


Fonte: O Autor

As Rugosidades S_q e S_a ficam estáveis e próximas a valores de $S_q \cong 7 \mu m$ e $\sigma = 1 \mu m$ e $S_a \cong 5 \mu m$ e $\sigma = 1 \mu m$.

Em relação a estrutura dos fundos de canal, podem ser feitas as mesmas observações quanto aos valores de Skewness e Kurtosis e estão apresentadas na Figura 27

Figura 27 Comportamento do valor de Skewness em função do avanço por dente.



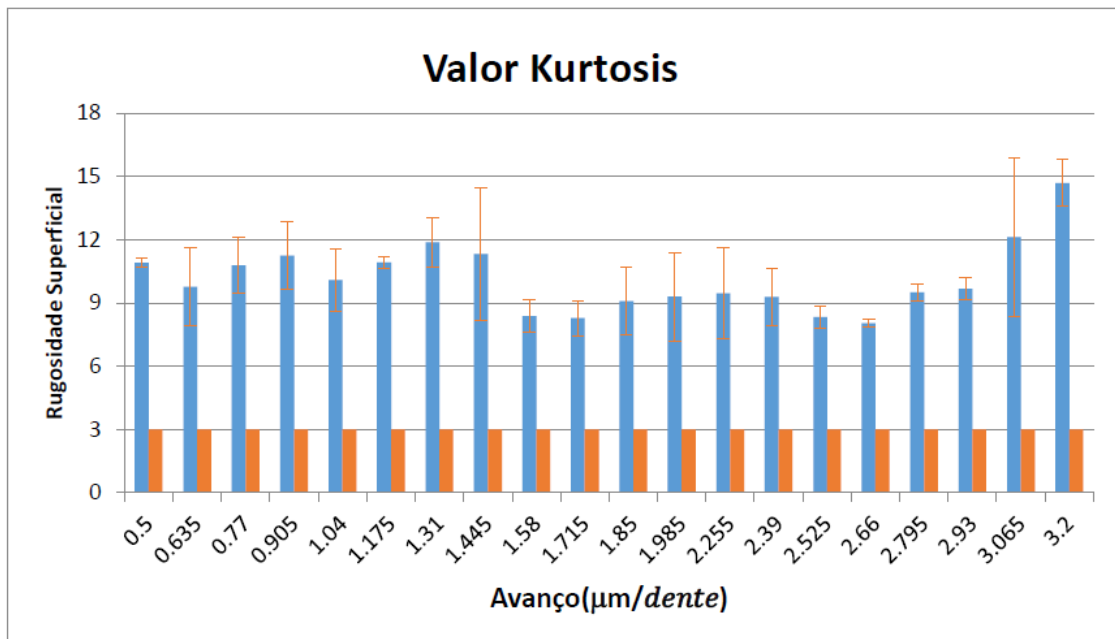
Fonte: O Autor

Observando o perfil da superfície no fundo do canal podemos entender que até um avanço por dente de $f_z \cong 1,5 \mu m$ havia predominância de vales, $S_{sk} < 0$ Figura 27, entre os valores $1,5 \mu m \leq f_z \leq 2,3 \mu m$ não se pode concluir qual o perfil devido a margem de erro estar cruzando a referência do zero. Com $f_z \cong 2,4 \mu m$ volta-se a ter vales e, por fim, com $f_z \cong 3,0 \mu m$ é possível obter perfis de picos na superfície do fundo de canal. Estes valores possivelmente estão sofrendo influência dos defeitos e da interação da ferramenta com material, onde a principal influência de defeito é alavancada pelo sulcamento.

Com relação ao Kurtosis, os valores foram estimados para esses canais e estão apresentados na Figura 28. Com relação aos elevados valores de Kurtosis, pode-se atribuir ao efeito dos resíduos do corte que permaneceram aderidos ao fundo do canal e não foi possível removê-los plenamente.

Quanto as formas desses picos e vales, o valor kurtosis indica apenas a existência de picos ou vales agudos devido ao valor ser maior que três, Figura 28, em todos os ensaios corroborando com a proposta que durante a formação dessas estruturas a ductilidade do alumínio estaria se deformando de uma maneira elástica até o rompimento. Essa deformação geraria um perfil de superfícies com pontos alongados e vales profundos.

Figura 28 Comportamento do valor de Kurtosis em função do avanço por dente.



Fonte: O Autor

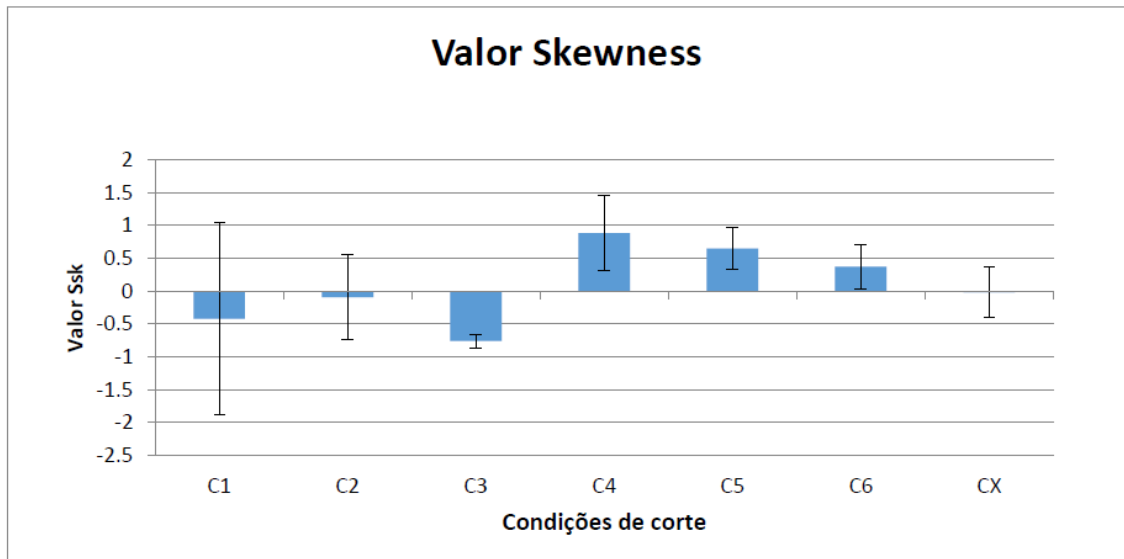
4.1.4. Fresamento tangencial feito em cobre eletrolítico

Baseado nos resultados obtidos com a liga RSA 6061, foram feitas usinagens de fresamento com disco de serra com os mesmos parâmetros usados seguindo a Tab.11. No entanto, os resultados obtidos não foram promissores e por isso não se avançou nesta direção. Apresentamos aqui os resultados mais para feito de ilustrar a diferença no comportamento do cobre eletrolítico em relação ao que se pode retirar dos dados de rugosidade do fundo de canal e deformação de paredes. As Figuras 29 e 30 apresentam os resultados de Skewness e Kurtosis para a série de canais usinados em cobre.

Observando-se os valores de Skewness podemos concluir que de apenas as condições C4, C5 e C6 tem um perfil definido de predominância de picos enquanto nos outros parâmetros o erro é maior que a medida, não podendo ter conclusões definitivas.

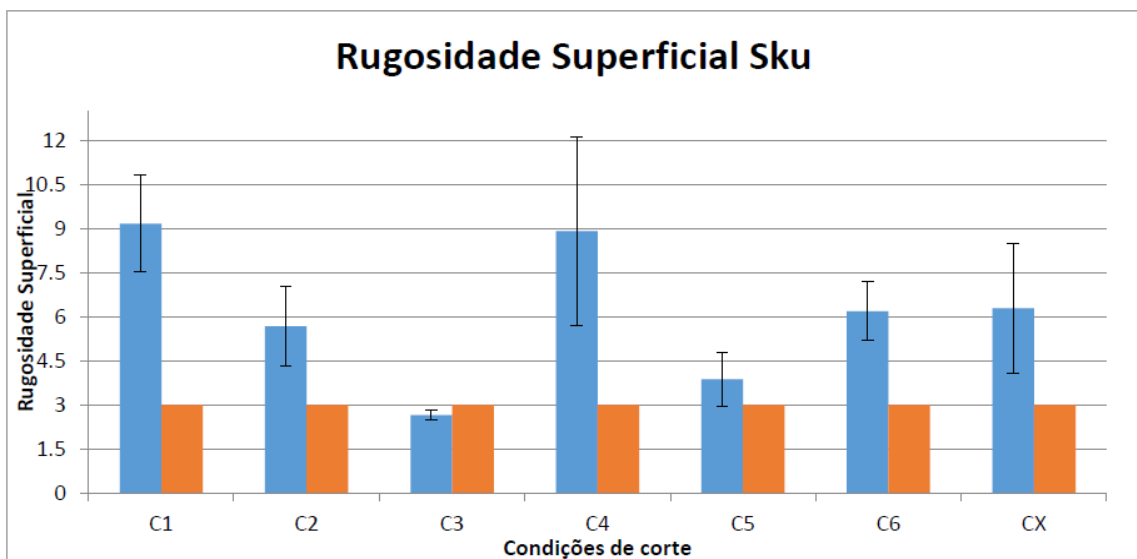
Comparado com os resultados de fundo de canal com o do alumínio, apenas o C4 foi igual para os dois materiais, $S_{sk} > 0$ havendo inversão nas condições C5 e C6 comparadas ao alumínio, $S_{sk_{Cobre}} > 0$ e $S_{sk_{Alumínio}} < 0$.

Figura 29 Comportamento da Rugosidade Skewness em função dos parâmetros de corte



Fonte: O Autor

Figura 30 Comportamento de Kurtosis do fundo do canal em função dos parâmetros de corte da Tab.11



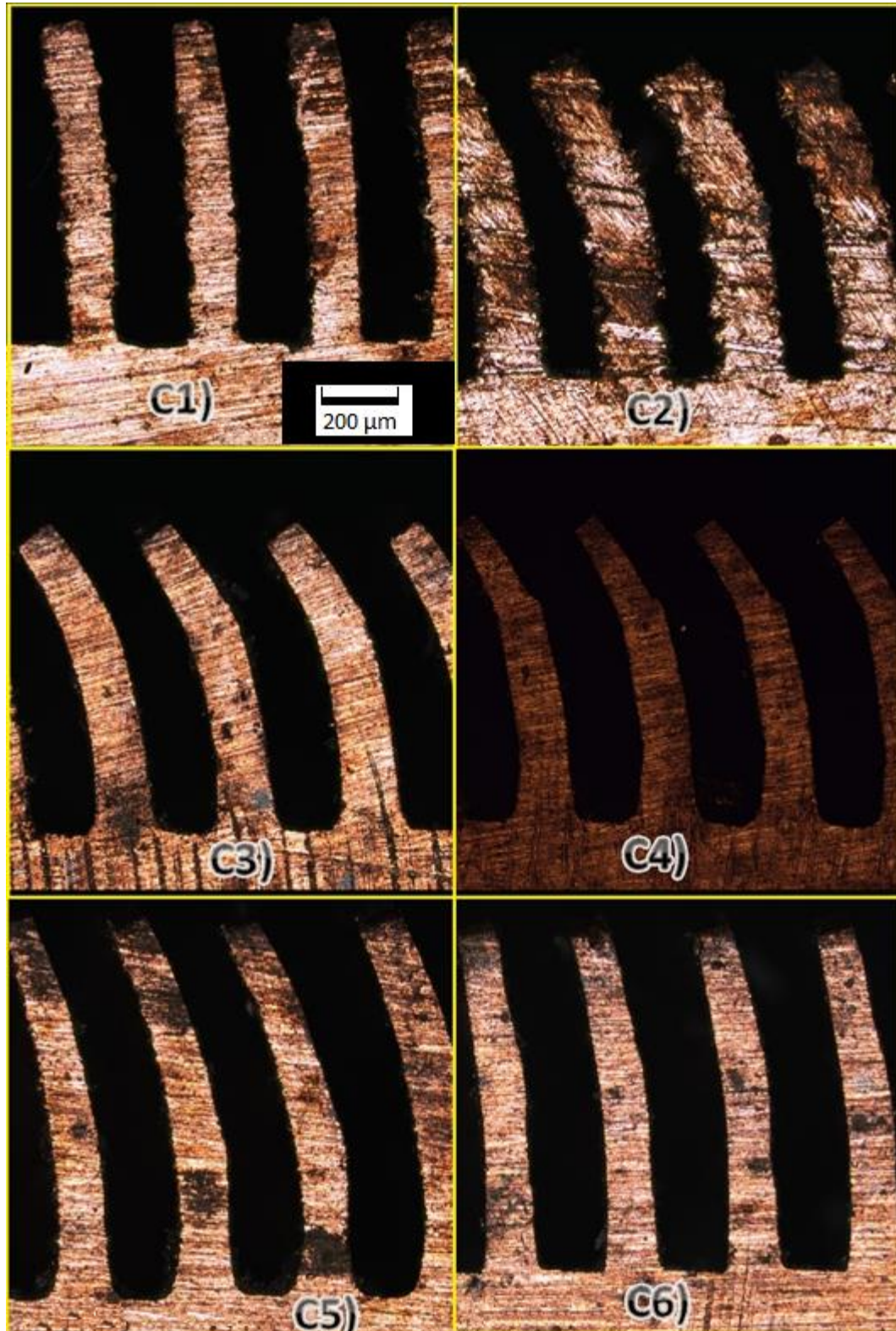
Fonte: O Autor

Das definições de perfil temos que foram predominantemente agudos em todas as condições com exceção da condição C3. Observando em paralelo esses valores com os resultados obtidos no alumínio, Figura 18, podemos notar que houve inversão de comportamento para condições C5 e C6, ou seja, $S_{sk_{Cobre}} > 3$ e $S_{sk_{Alumínio}} < 3$.

Uma observação importante quanto a formação das microparedes no cobre foi que

em todas as condições da Tab.11 geraram paredes flexionadas, que pode ser observado segundo a Figura 31.

Figura 31 Perfil das microparedes em cada condição de corte.

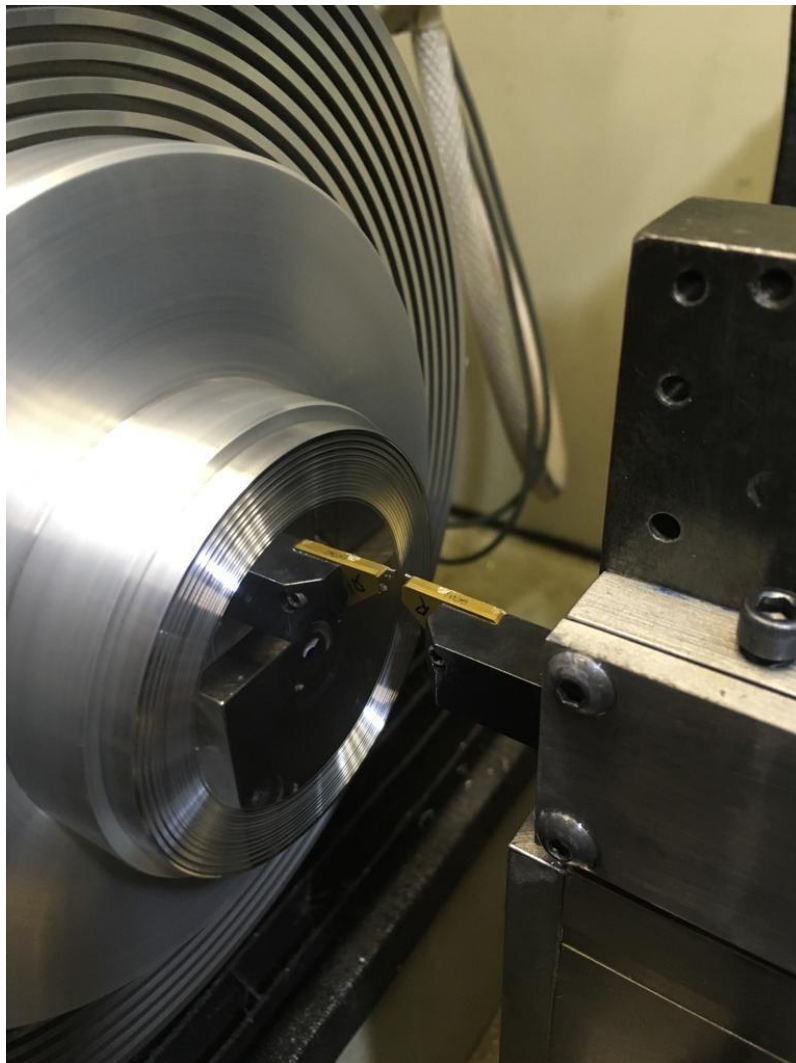


Fonte: O Autor

4.2. Canais radiais por sangramento na face da peça.

Usando o torno de ultra precisão descrito anteriormente com os seguintes parâmetros: Velocidade de corte de $v_c = 140 \text{ m/min}$ a $v_c = 110 \text{ m/min}$, velocidade de corte é variável pois a rotação é constante e igual a 1000 RPM , com avanço axial constante de $f = 1 \text{ }\mu\text{m/volta}$ ou $v_f = 1 \text{ mm/min}$. Os canais são projetados para ter a espessura do bedame conforme descrito no tópico 2.5. e as paredes são divididas em três blocos, o primeiro com espessuras de parede de $150\text{ }\mu\text{m}$, o segundo bloco com espessura de parede de $100\text{ }\mu\text{m}$ e o terceiro com espessura de parede de $50\text{ }\mu\text{m}$. O esquema de montagem e fabricação pode ser observado pela figura 32 onde a peça está montada no torno de ultra precisão para a fabricação de canais circulares.

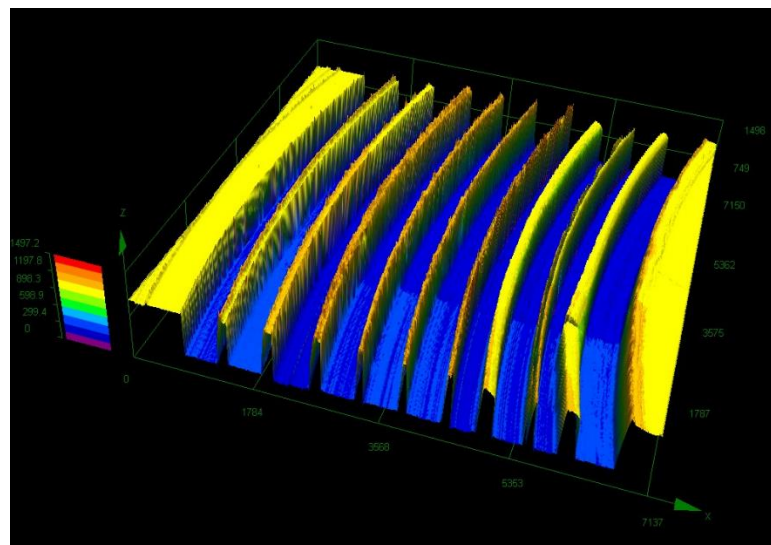
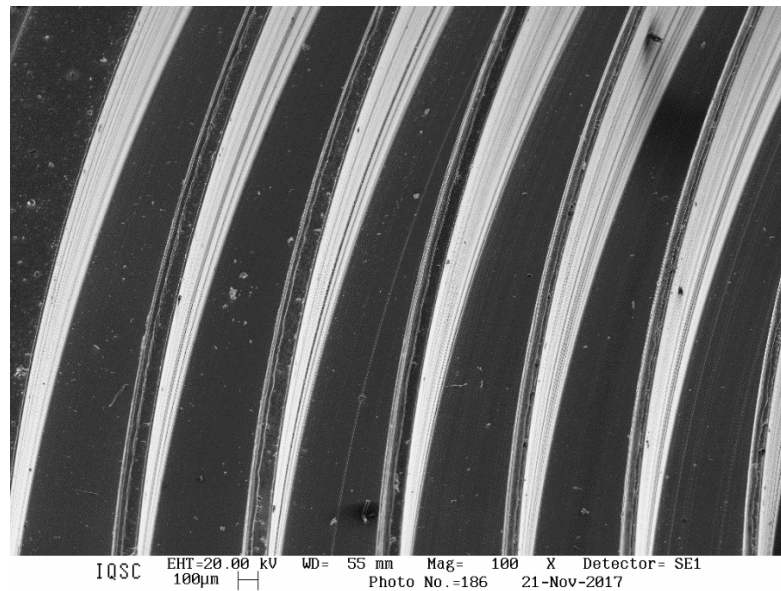
Figura 32 Esquema da montagem do corpo de prova para confecção do ensaio.



Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 35 e 36 que revelam o perfil de cada parede e a formação de rebarba das mesmas. Sendo assim pode-se observar que dessa confecção de canais circulares:

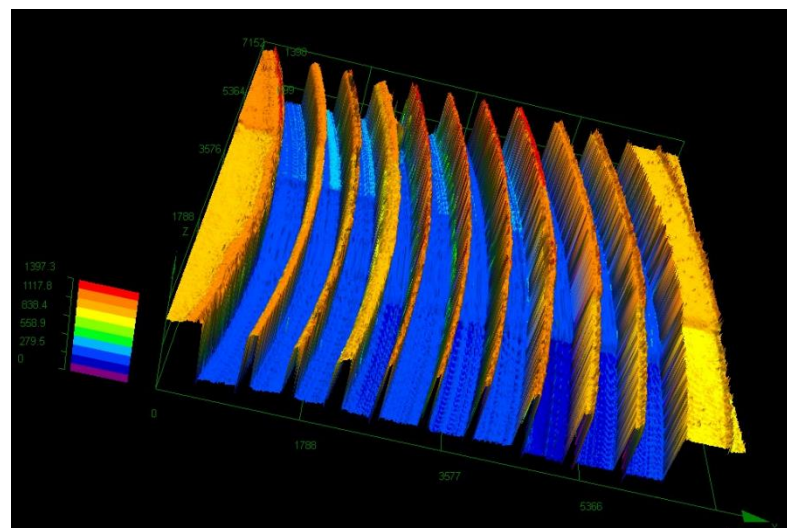
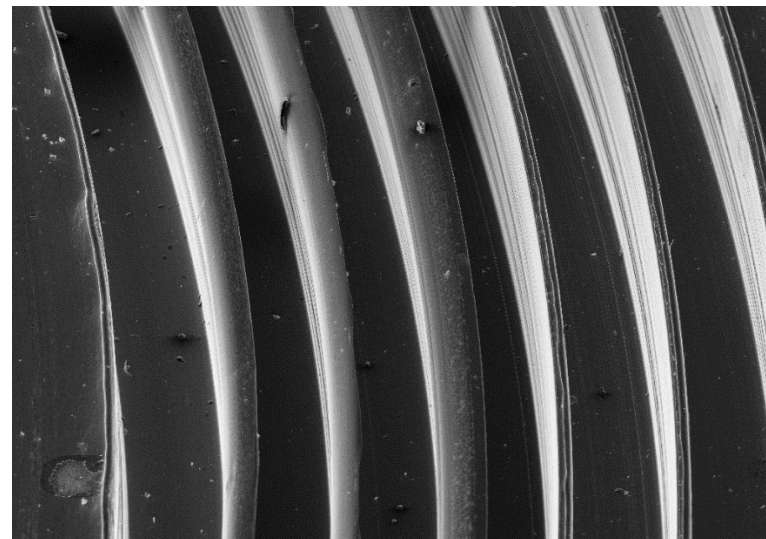
- Paredes de $100\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$ de espessura são formadas sem dificuldades apesar da espessura de corte estar abaixo do raio de aresta ,Fig.33.
- Paredes de $50\mu\text{m}$ mostram defeitos quanto a estrutura nos passes finais. A principal explicação para isso se dá pela interferência do corpo do bedame na lateral da parede, que por ser muito delgada não suporta a força e rompe, Figura 34.

Figura 33 Paredes circulares de $150\mu\text{m}$, três primeiras da esquerda para direita, $100\mu\text{m}$ três primeiras paredes da direita para esquerda



Fonte: O Autor

Figura 34 Paredes circulares de 50 μ m, três primeiras da esquerda para direita, 100 μ m três primeiras paredes da direita para esquerda



Fonte: O Autor

As paredes que apresentam uma razão de aspecto máxima de 20x, espessuras de 50 μ m, começaram a romper na parte superior. A remoção de material foi através do corte do material e não do sulcamento já que durante a usinagem foi possível coletar um cavaco contínuo em forma de fita.

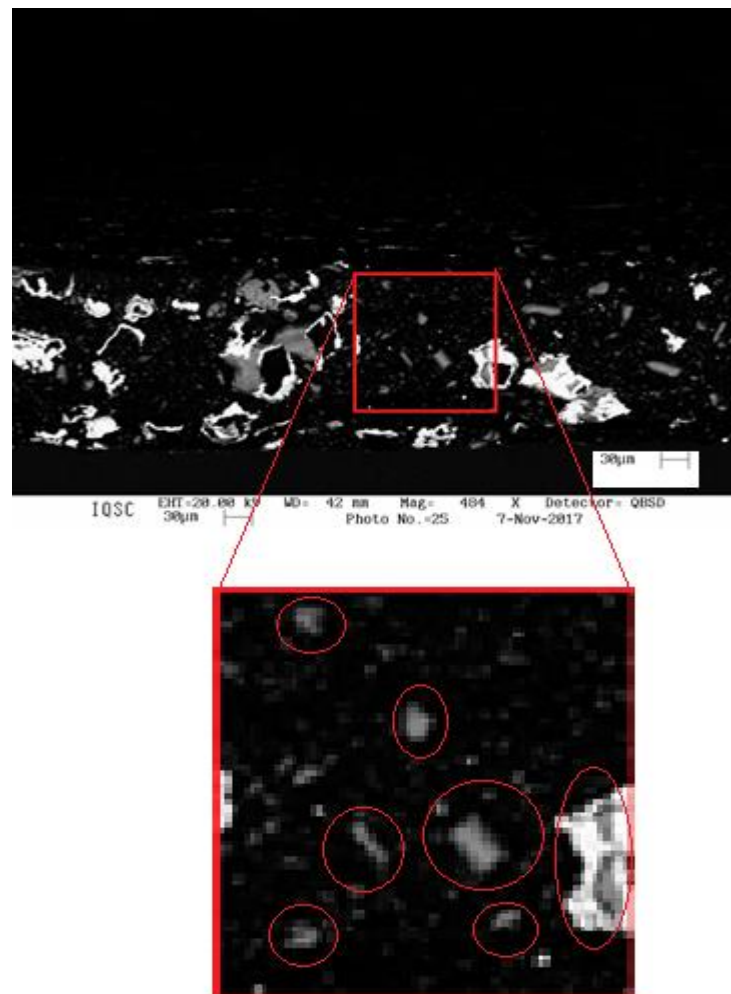
A Principal contribuição desses ensaios de paredes circulares foi ao fato de se conseguir criar paredes com razão de aspecto maior que 10 vezes obtidos, de forma máxima, no fresamento tangencial. Essa estabilização de formação se dá principalmente ao fato de haver uma remoção de material mais próxima do corte, diminuindo a força necessária par o mesmo.

4.3. Usinagem de canais com corte de disco abrasivo

O corte com o disco abrasivo foi idealizado com o objetivo de se formar paredes e canais com alto grau de acabamento por se tratar de uma mescla de um fresamento com retificação.

Os parâmetros usados foram de velocidade de corte de $v_c = 5200 \text{ m/min}$, a velocidade alta de corte se dá pois há uma combinação de alto giro 30.000 RPM com um diâmetro de 55 mm e o avanço foi de 60 mm/min . A Figura 35 mostra uma imagem de MEV da superfície do disco cortante.

Figura 35 Aresta de corte do disco abrasivo



Fonte: O autor

O detalhe destacado na figura 35 mostra uma área aproximada de $A = 0,0243 \text{ cm}^2$ e como pode ser observado há aproximadamente 7 grãos que poderiam participar do

processo de remoção de material que estão na cor cinza. Sendo assim comprovando que a relação de aproximadamente 300 grãos por centímetro quadrado.

Para se fazer uma estimativa da energia envolvida com o processo de remoção poderíamos aplicar o método proposto em Groover 2007:

$$P_c = u \times TRM = u \times v_f \times ap \times b \quad (10)$$

Onde:

u : energia específica de corte para o RSA 6061 (3640 N/mm²)

v_f é a velocidade de avanço (60 mm/min);

ap é a profundidade de usinagem (1,5 mm)

b é a largura de corte

Assim:

$$P_c = u \times TRM = u \times v_f \times ap \times b = \quad (11)$$

$$P_c = 3640 \frac{N}{mm^2} \times 60 \frac{mm}{min} \times 1,5 mm \times 0,256 mm \cong 1398 W$$

A força de corte pode ser estimada por:

$$F_{corte} = u \times \frac{v \times ap \times b}{V} \quad (12)$$

Onde:

v é a velocidade de avanço da mesa (mm/seg);

V é a velocidade de corte do disco (mm/seg).

Portanto,

$$F_{corte} = u \times \frac{v \times ap \times b}{V} = 364 \times \frac{1 \times 1,5 \times 0,256}{89.771} = 1,557 mN$$

A força de corte em um único grão:

$$F_{grão} = \frac{u \times r \times t^2}{2} \quad (13)$$

Onde:

r é a razão entre a largura e a espessura do cavaco, geralmente o valor é entre 10 e 20.

t é a espessura do cavaco (mm).

Para calcular a espessura t do cavaco usa-se a seguinte relação:

$$t = \sqrt{\frac{4 \times v}{V \times c \times r} \times \sqrt{\frac{ap}{D}}} \quad (14)$$

Onde:

c = número de arestas de corte (grãos) por unidade de área (típico 0.1 a 10 por mm^2) e nesse caso será um valor entre 270 e 325 grãos por cm^2 ou aproximadamente 3 grãos por mm^2 ,

D é o diâmetro do disco de corte.

Assim,

$$t = \sqrt{\frac{4 \times 60}{5.386.260 \times 3 \times 15} \times \sqrt{\frac{1,5}{57,15}}}$$

$$t = 2,4 \times 10^{-6} \text{ mm}$$

A força em um grão será:

$$F_{\text{grão}} = \frac{u \times r \times t^2}{2}$$

$$F_{\text{grão}} = 1,6 \times 10^{-4} \text{ mN}$$

Deve-se ressaltar que esta estimativa pode ser considerada grosseira, porém pode-se ter uma aproximação dimensional dos esforços gerados durante a usinagem.

O corte é feito em um único mergulho da ferramenta em no eixo z e depois o avanço ajustado na direção y . As imagens do corte podem ser vistas nas figuras 36 e 37.

Podemos observar que:

Na entrada da ferramenta houve menor formação de rebarba quando comparada com a saída da ferramenta;

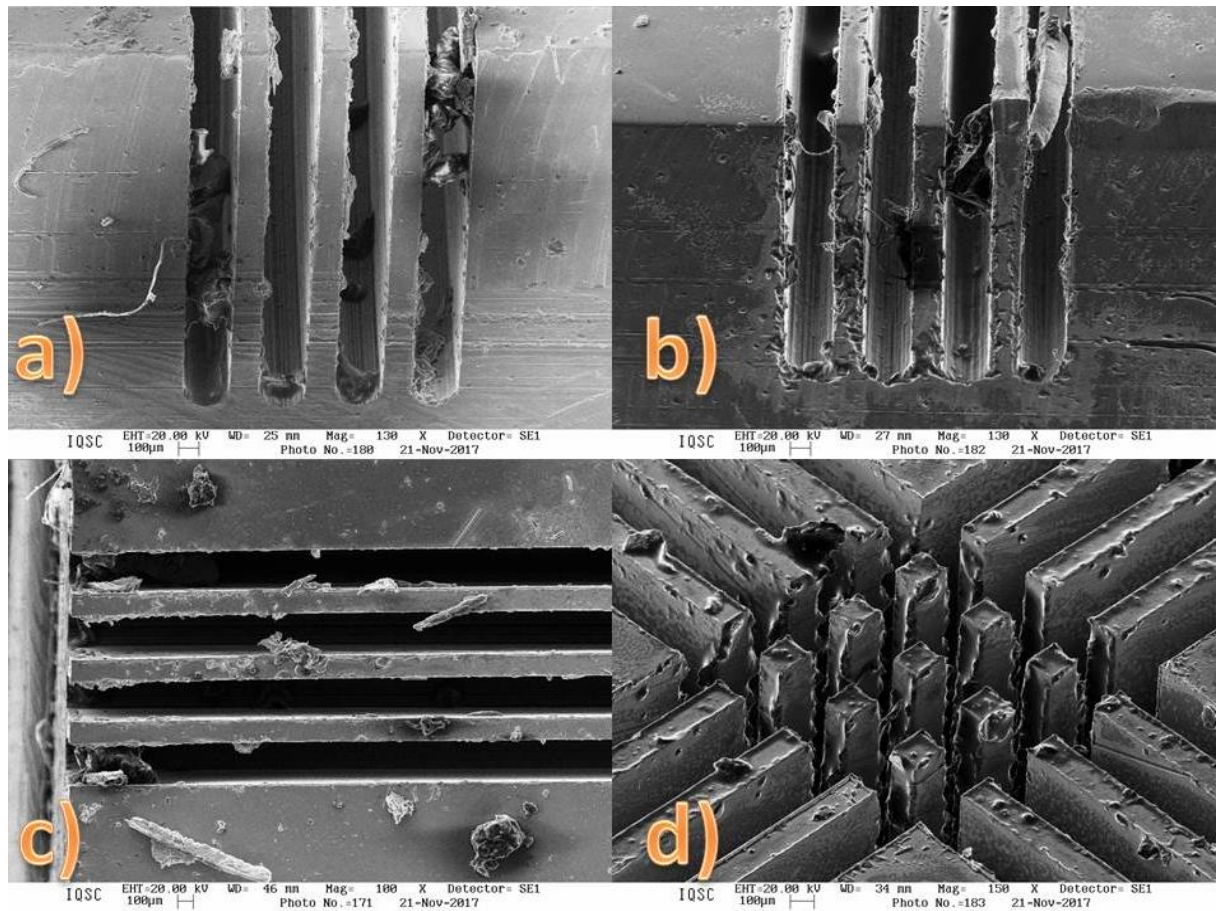
A formação de rebarbas no topo da parede é visualmente menor do que as usinagens

de fresamento, mas maior que a de torneamento;

Devido a geometria da ferramenta o fundo do canal fica abaulado deixando a medida de rugosidade imprecisa no microscópio confocal;

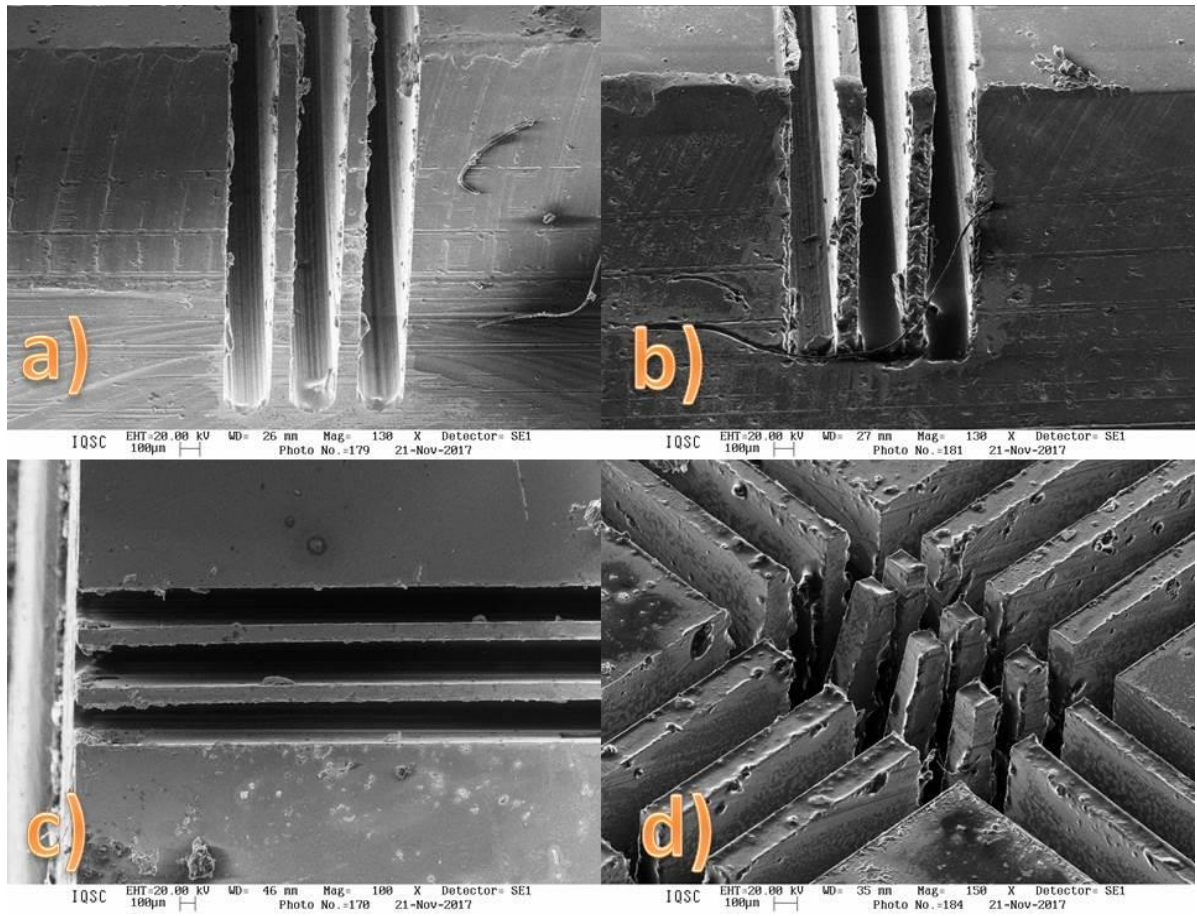
A possibilidade do cruzamento dos canais só foi possível quando as espessuras dos mesmos fossem maiores ou iguais a $150\mu\text{m}$.

Figura 36 a) Entrada da ferramenta; b) Saída da ferramenta; c) Visão superior; d) visão de perfil no cruzamento de canais.



Fonte: O Autor

Figura 37 a) Entrada da ferramenta; b) Saída da ferramenta; c) Visão superior; d) visão de perfil no cruzamento de canais.



Fonte: O Autor

5. Conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

A formação de microparedes pelo processo do fresamento tangencial só é promissor quando usado para a liga de alumínio RSA 6061. Isso é devido ao fato de que todos os ensaios feitos no cobre eletrolítico geraram flexão das paredes.

Foi possível fazer um mapeamento do comportamento das superfícies do fundo de canal e da lateral da parede em relação aos parâmetros de rugosidade Skewness e Kurtosis. Em relação ao parâmetro Skewness todas as possibilidades foram obtidas para o fresamento tangencial, sendo elas predominância de: picos/picos; picos/vales; vales/picos e vales/vales para fundo de canal e lateral de parede respectivamente. Em relação ao Kurtosis, só foi possível as combinações de agudos/agudos e suave/agudos para fundo de canal e a lateral de parede respectivamente.

Para diminuir as rebarbas na saída do fundo de canal das peças de alumínio, foi mudado a geometria da peça, de modo que o canto da peça, que anteriormente era de 90° , passasse a ter uma nova geometria: arredondado para dentro. Essa mudança foi significativamente positiva pois as maiores rebarbas deixaram de ser formadas, ou seja, não há necessidade de pós trabalho para limpeza ou remoção de rebarbas relativas as de fundo de canal.

A fabricação de paredes circulares foi possível para espessuras de $150\mu m$, $100\mu m$ com razões de aspecto de 6,6 e 10 respectivamente. Para a espessura de $50\mu m$, as paredes ficaram muito mais frágeis a atuação forças durante a usinagem, fazendo com que algumas chegassem até a se romper. Importante lembrar que durante essa usinagem o material saiu na forma uma fita, contínuo, mostrando que há uma melhora quanto ao desempenho do processo de fabricação devido ao caráter contínuo do cavaco.

O corte abrasivo foi capaz de produzir paredes de $150\mu m$ e $100\mu m$ sem que houvessem deformações e pouca formação de rebarbas, tanto no topo das paredes quanto no fundo de canal. Ainda foi possível cruzar esses canais, porém, apenas houve estabilidade quando a espessura de parede foi maior ou igual a $150\mu m$.

É importante salientar que nos ensaios feitos com o corte de disco abrasivo foram obtidas razões de aspecto superiores ao fresamento tangencial. Isso se deu pois as profundidades de corte usadas foram de 1,5mm enquanto a espessura da parede chegou a

ser de $100\mu m$ fazendo uma razão de aspecto de 15. Uma possível explicação para isso seria o fato da força empregada no fresamento tangencial ser quase 10 vezes maior que o empregado no corte de disco abrasivo. A diminuição dos esforços corroborou com a estabilidade do processo e assim a possibilidade de se aumentar a razão de aspecto.

Por fim, foi possível criar as microparedes através de três processos diferentes, fresamento tangencial, sangramento facial e corte por disco abrasivo. Cada um deles fornecendo características específicas, como controle das superfícies geradas em relação aos parâmetros de rugosidade Skewness e Kurtosis, especificamente para o fresamento, paredes com geometria circular e altas razões de aspecto sem a necessidade de retrabalho.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para trabalhos futuros seriam em estudar mais a fundo a relação do material da peça de trabalho com o processo de fabricação de fresamento tangencial. Fazendo isso para tentar obter outras condições de corte onde seriam possíveis completar o quadro de possibilidades das combinações de valores Skewness e Kurtosis.

Outra sugestão seria relacionar o material da peça com a geometria da parede e as forças de corte usadas para prever qual seria a razão de aspecto máxima para cada conjunto de combinações.

Por fim a última sugestão seria estudar a viabilidade da fabricação de microtrocares de calor, nessas mesmas medidas, por extrusão. Isso, porque para trocadores de calor de equipamentos eletrônicos, processadores, são feitos por extrusão, porém quando se reduz a escala, pode ocorrer outros problemas ao escoamento do material e processo de crescimento de grão.

Anexo

- **Medição de Rugosidade**

A rugosidade foi o parâmetro usado para medir de forma qualitativa a parede formada, porém é importante saber qual parâmetro da rugosidade foi utilizado para o aferimento da mesma pois existem várias medidas de rugosidade.

As principais rugosidades que foram medidas foram S_a , S_{sk} e S_{ku} sendo elas Rugosidade superficial aritmética, Skewness e Kurtosis. É importante notar que os valores de cada um são dados em S e não em R pois as medidas em R seriam apenas lineares e o equipamento consegue fazer a medida de uma área inteira. Sendo assim uma medida já contém, em si, várias outras que contribuíram para o desenvolvimento estatístico do estudo.

S_a – Rugosidade superficial aritmética

A Rugosidade Superficial aritmética pode ser definida segundo Whitehouse (2009) através da seguinte função:

$$S_a = \int_{x_0}^{x_f} \int_{y_0}^{y_f} |Z(x, y)| \cdot dx \cdot dy \quad (15)$$

Sendo x_0 e y_0 como os pontos iniciais da função descrita pela área Z e x_f e y_f como sendo os pontos finais da mesma função Z que descreve área.

Essa equação devolve uma superfície descrita como um plano que passa pelo média aritmética dos pontos da função da área.

Esse parâmetro apesar de ser utilizado com uma certa frequência ou mesmo seu parâmetro linear R_a não descrever perfeitamente como é o comportamento da superfície mas sim se a superfície média tem uma distância grande da referência, ou seja, se tem muitos defeitos como picos ou vales.

Para uma determinação mais específica do comportamento da superfície é importante entender outros dois parâmetros de rugosidade o Skewness e o Kurtosis.

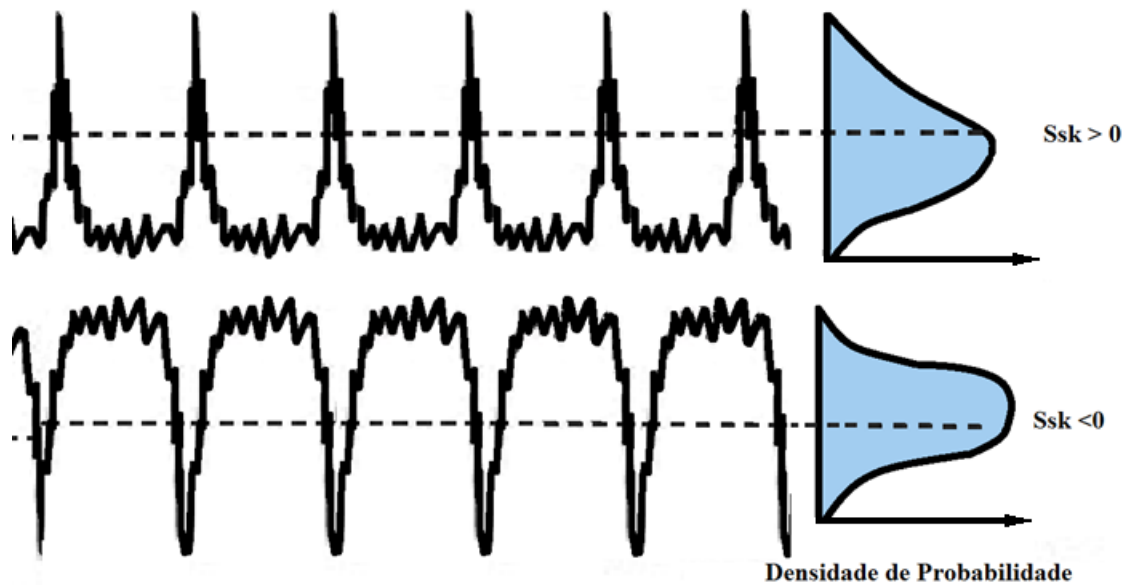
S_{sk} – Skewness

A Rugosidade Superficial Skewness segundo Whitehouse (2009) representa o grau de simetria das alturas em relação ao plano médio e pode ser dado pela equação:

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \int_{x_0}^{x_f} \int_{y_0}^{y_f} (Z(x, y))^3 \cdot dx \cdot dy \quad (16)$$

Onde o valor de S_q é a rugosidade superficial quadrática e valor S_{sk} tem como função indicar a predominância de picos ou vales sendo $S_{sk} > 0$ para picos e $S_{sk} < 0$ para vales como descrito na figura 38.

Figura 38 Representação Linear dos possíveis valores de Skewness.



O autor

A partir dos dados de valores skewness é importante compreender como os picos ou vales podem ser agudos ou suaves, esse dado é obtido pelo valor de Kurtosis.

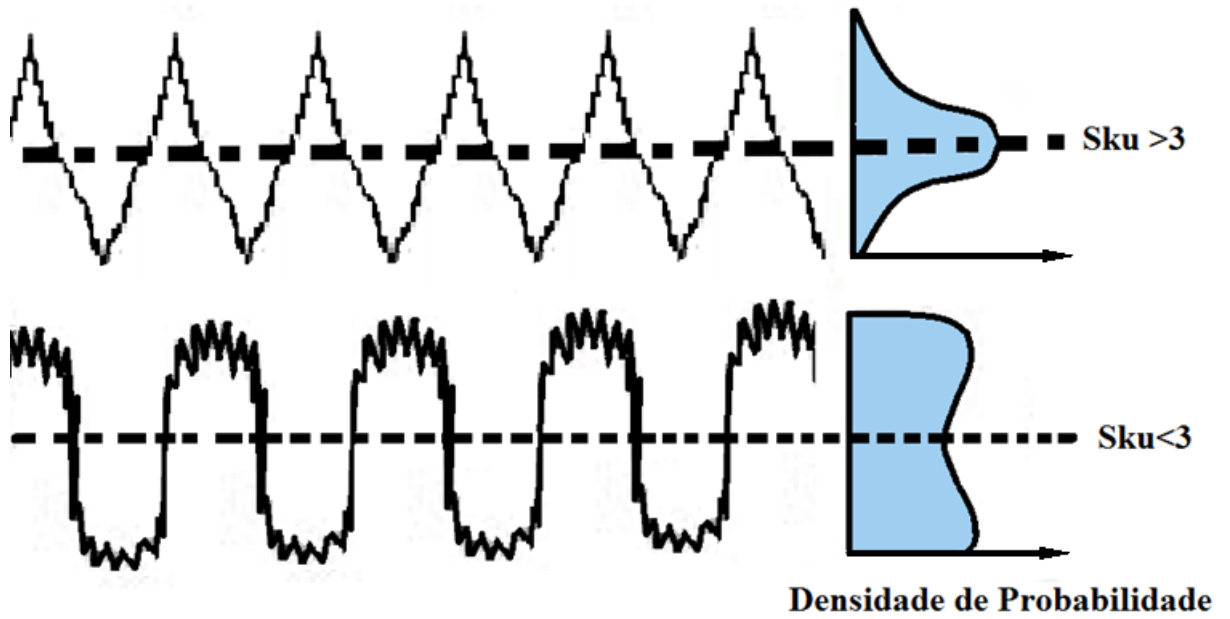
S_{ku} – Kurtosis

O valor de Kurtosis descreve como esses picos e vales, valor skewness, estarão dispostos e é dado segundo a equação:

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^4} \int_{x_0}^{x_f} \int_{y_0}^{y_f} (Z(x, y))^4 \cdot dx \cdot dy \quad (17)$$

Picos muito altos com vales muito profundos se dá para $S_{ku} > 3$ e quando há uma suavização desses picos e vales temos $S_{ku} < 3$ segundo a figura 39.

Figura 39 Representação linear dos diferentes valores para Kurtosis.



O Autor

Referências

ABDELGAWAD, M. et al. A Fast and simple method to fabricate circular microchannels in polydimethylsiloxane (PDMS). In: IEEE CONFERENCE ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, 23., 2010, Wanchai. Proceedings... Piscataway: IEEE, 2010. p. 1071–1074.

ARAUJO, L. A. O. **Estudo do corte abrasivo de quartzo para a fabricação de geradores piezelétricos.** 2015. 196p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ARNAUD, L. et al. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 54, n. 5–8, p. 479–488, 2011.

ASSIS, C. L. F. **Microfresamento de aços com grãos ultrafinos.** 2013. 101p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

AURICH, J. C. et al. Burrs-analysis, control and removal. **CIRP Annals - manufacturing technology**, v. 58, n. 2, p. 519–542, 2009.

BAI, X. et al. Polyelectrolyte-modified short microchannel for cation separation. **Electrophoresis**, v.25, n.6, p. 931–935, 2004.

BAO, N. et al. Fabrication of poly (dimethylsiloxane) microfluidic system based on masters directly printed with an office laser printer. **Journal of Chromatography**, v. 1089, n.1/2, p. 270–275, 2005.

BARKER, S. L. R. et al. Plastic microfluidic devices modified with polyelectrolyte multilayers. **Analytical Chemistry**, v. 72, n. 20, p. 4899–4903, 2000.

BECKER, H.; LOCASCIO, L. E. Polymer microfluidic devices. **Talanta**, v. 56, n.2, p. 267–287, 2002.

BERUVIDES, G. et al. Surface roughness modeling and optimization of tungsten-copper alloys in micro-milling processes. **Measurement: journal of the international measurement confederation**, v. 86, p. 246–252, 2016.

CASTAÑO-ÁLVAREZ, M.; FERNÁNDEZ-ABEDUL, M. T.; COSTA-GARCÍA, A. Poly (methylmethacrylate) and topas capillary electrophoresis microchip performance with electrochemical detection. **Electrophoresis**, v.26, n.16, p. 3160–3168, 2005.

CHENG, Y. et al. Mid-infrared ridge waveguide in MgO:LiNbO3 crystal produced by combination of swift O5+ ion irradiation and precise diamond blade dicing. **Optics and Laser Technology**, v. 81, p. 122–126, 2016.

CHERN, G. L.; CHANG, Y. C. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 6, p. 659–666, 2006.

CHOUDHURY, I. A. Ñ.; SHIRLEY, S. Optics & laser technology laser cutting of polymeric materials : an experimental investigation. **Optics and Laser Technology**, v. 42, n. 3, p. 503–508, 2010.

DUONG, T. H. et al. A Theoretical deformation prediction of micro channels in ultra-precision machining. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 14, n. 2, p. 173–181, 2013.

DWIVEDI, V. K.; GOPAL, R.; AHMAD, S. Fabrication of very smooth walls and bottoms of silicon microchannels for heat dissipation of semiconductor devices. **Microelectronics Journal**, v. 31, n.6, p. 405–410, 2000.

FILIZ, S. et al. An Experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**,

v. 47, n. 7–8, p. 1088–1100, 2007.

FLORIAN, C.; MORENZA, J. L.; SERRA, P. Applied surface science femtosecond laser ablation of polymethyl-methacrylate with high focusing control. **Applied Surface Science**, v. 278, p. 185–189, 2013.

FONSECA FILHO, C. F. **História da computação: o caminho do pensamento e da tecnologia**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

GROOVER, MIKELL P., **Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems**, Hoboken , NJ : John Wiley, c2007

JAVAREZ JUNIOR, L. **Estudo do processo de replicação por laminação em polimetilmetacrilato(PMMA) aquecido**. 2009. 108p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

JASINEVICIUS, R. G. USINAGEM DE METAIS NÃO FERROSOS. **USINAGEM DE ULTRA PRECISÃO** (p.276) Em A. J. POtto. São Carlos: RiMa. (2004).

JO, B.-H. et al. Three-dimensional micro-channel fabrication in polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer. **Journal of Microelectromechanical**, v. 9, n. 1, p. 76–81, 2000.

KAMITANI, A. et al. Sensors and actuators B : chemical microfabricated microfluidic fuel cells. **Sensors & Actuators: B. Chemical**, v. 154, n. 2, p. 174–180, 2011.

KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. The Effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of aluminum alloy 1100 in micro-milling operation. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 16, n. 4, p. 435–450, 2015.

LANE, B. M. et al. Diamond tool wear when machining Al6061 and 1215 steel. **Wear**, v. 268, n. 11–12, p. 1434–1441, 2010.

LAURO, C. H. et al. Specific cutting energy employed to study the influence of the grain size in the micro-milling of the hardened AISI H13 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 9–12, p. 1591–1599, 2015.

LI, J.; PETERSON, G.P. Geometric optimization of a micro heat sink with liquid flow. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, v. 29, n. 1, p. 145–154, 2006.

LIU, Y. et al. Micro milling of copper thin wall structure. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.90, n.1/4, p. 405-412, 2017.

LLANOS, I. et al. Micromilling high aspect ratio features using tungsten carbide tools. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 228, n. 11, p. 1350–1358, 2014.

MATHAI, G.; MELKOTE, S. Effect of process parameters on the rate of abrasive assisted brush deburring of microgrooves. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 57, p. 46–54, 2012.

MATHUR, A. et al. Characterisation of PMMA microfluidic channels and devices fabricated by hot embossing and sealed by direct bonding. **Current Applied Physics**, v. 9, n. 6, p. 1199–1202, 2009.

MELA, P. et al. The Zeta potential of cyclo-olefin polymer microchannels and its effects on insulative (electrodeless) dielectrophoresis particle. **Electrophoresis**, v.26, n.9, p. 1792–1799, 2005.

MISSAGIA, L. J. et al. Microchannel heat sinks for two-dimensional high-power-density diode laser arrays. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 25, n. 9, p. 1988–1992, 1989.

MUCK, A. et al. Fabrication of poly (methyl methacrylate) microfluidic chips by atmospheric molding. **Analytical Chemistry**, v. 76, n. 8, p. 2290–2297, 2004.

NAKASHIMA, S.; SUGIOKA, K.; MIDORIKAWA, K. Fabrication of microchannels in single-crystal GaN by wet-chemical-assisted femtosecond-laser ablation. **Applied Surface Science**, v. 255, n.24, p. 9770–9774, 2009.

PAL, P.; SATO, K. Various shapes of silicon freestanding microfluidic channels and microstructures in one-step lithography. **JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING**, v. 55003, p. 17, 2009.

PAN, M.; ZENG, D.; TANG, Y. Feasibility investigations on multi-cutter milling process: A novel fabrication method for microreactors with multiple microchannels. **Journal of Power Sources**, v. 192, n. 2, p. 562–572, 2009.

PRAKASH, S.; KUMAR, S. Fabrication of microchannels: a review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part B: journal of engineering manufacture** , v.229, n.8, p.1273-1288, 2014.

QIN, S.; LI, W. J. Micromachining of complex channel systems in 3D quartz substrates using Q-switched Nd : YAG laser. **Applied Physics A**, v. 777, n.6, p. 773–777, 2002.

SEGUY, S.; DESSEIN, G.; ARNAUD, L. Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interactionsInternational. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.48, n.3/4, p.261-274, 2008.

SERRANO, D. et al. Laser fabricated microchannels inside photostructurable glass-ceramic. **Applied Surface Science**, v. 255, n. 10, p. 5499–5502, 2009.

SRINIVASA, Y. V.; SHUNMUGAM, M. S. Mechanistic model for prediction of cutting forces in micro end-milling and experimental comparison. **International Journal of Machine Tools**

and Manufacture, v. 67, p. 18–27, 2013.

STÖBENER, D.; BEEKHUIS, B. Application of an in situ measuring system for the compensation of wall thickness variations during turning of thin-walled rings. **CIRP Annals**, v. 62, n.1, p. 511–514, 2013.

TAKEUCHI, Y. et al. Creation of ultra-precision microstructures with high aspect ratios. **CIRP Annals**, v. 55, n. 1, p. 107–110, 2006.

TANG, Y. et al. Ring-shaped microchannel heat exchanger based on turning process. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 34, n. 8, p. 1398–1402, 2010.

TANG, Y. et al. Burr formation in milling cross-connected microchannels with a thin slotting cutter. **Precision Engineering**, v. 35, n. 1, p. 108–115, 2011.

TUCKERMAN, D. B.; PEASE, R. F. W. High-Performance Heat Sinking for VLSI. **IEEE Electron Device Letters**, v. 2, n. 5, p. 126–129, 1981.

VÁZQUEZ, E. et al. Swarm intelligent selection and optimization of machining system parameters for microchannel fabrication in medical devices. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 26, n. 3, p. 403–414, 2011.

WAN, Z. et al. Characteristics and mechanism of top burr formation in slotting microchannels using arrayed thin slotting cutters. **Precision Engineering**, v. 38, n. 1, p. 28–35, 2014.

WHITEHOUSE, D. J. Michigan metrology. v. 1992, n. 203, p. 1–46, 2009.

ZENG, D. et al. Fabrication and characteristics of cube-post microreactors for methanol steam reforming. **Applied Energy**, v. 91, n. 1, p. 208–213, 2012.

ZHAN, Z. et al. Precision milling of tungsten carbide with micro PCD milling tool.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 77, n. 9/12, p. 2095–2103, 2015.

ZHANG, J. et al. Review of micro/nano machining by utilizing elliptical vibration cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 106, p. 109–126, 2016.

ZHONG, L. et al. Fabrication of PCD micro cutting tool and experimental investigation on machining of copper grating. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.88, n.9/12, p. 2417–2427, 2016.

Bibliografia Consultada

ABOU-EL-HOSSEIN, K.; OLUFAYO, O.; MKOKO, Z. Diamond tool wear during ultra-high precision machining of rapidly solidified aluminium RSA 905. **Wear**, v. 302, n. 1–2, p. 1105–1112, 2013.

AFAZOV, S. M.; RATCHEV, S. M.; SEGAL, J. Modelling and simulation of micro-milling cutting forces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 15, p. 2154–2162, 2010.

AFAZOV, S. M. et al. Chatter modelling in micro-milling by considering process nonlinearities. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 56, p. 28–38, 2012.

AGIRRE, A.; URRETA, H.; THEPSONTHI, T. Micromilling high aspect ratio features using tungsten carbide tools. v. 228, n. 11, p. 1350–1358, 2014.

AIJUN, T.; ZHANQIANG, L. Deformations of thin-walled plate due to static end milling force. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 206, n. 1–3, p. 345–351, 2008.

ALEXANDER, I. et al. Machining of Thin-walled Parts Produced by Additive Manufacturing Technologies. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 1023–1026, 2016.

ANNONI, M.; REBAIOLI, L.; SEMERARO, Q. Thin wall geometrical quality improvement in micromilling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 5–8, p. 881–895, 2015.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, v. 33, n. 4, p. 402–407, 2009.

ARAUJO, L. A. O. **Estudo do corte abrasivo de quartzo para a fabricação de geradores piezelétricos**. 2015. 196p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ARDILA L. K. R. et al. Micro-Milling Process for Manufacturing of Microfluidic Moulds. n. February 2016, 2015.

ARNAUD, L. et al. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 54, n. 5–8, p. 479–488, 2011.

ASSIS, C. L. F. **Microfresamento de aços com grãos ultrafinos**. 2013. 101p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, universidade de São Paulo, São Carlos, 2013

AURICH, J. C.; REICHENBACH, I. G.; SCHÜLER, G. M. Manufacture and application of ultra-small micro end mills. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 83–86, 2012.

AURICH, J. C. et al. Burrs-Analysis, control and removal. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 2, p. 519–542, 2009.

BAGABER, S. A.; YUSOFF, A. R. Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316. **Journal of Cleaner Production**, v. 157, p. 30–46, 2017.

BEN HMIDA, R. et al. Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations. **Materials and Design**, v. 45, p. 155–165, 2013.

BRINKSMEIER, E.; RIEMER, O.; SCHÖNEMANN, L. High performance cutting for ultra-precision machining. **International Journal of Nanomanufacturing**, v. 11, n. 5/6, p. 245, 2015.

CÂMARA, M. A. et al. Determination of the critical undeformed chip thickness in micromilling by means of the acoustic emission signal. **Precision Engineering**, v. 46, p. 377–382, 2016.

CÂMARA, M. A. et al. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 28, n. 8, p. 673–685, 2012.

CAO, X. D.; KIM, B. H.; CHU, C. N. Micro-structuring of glass with features less than 100 μm by electrochemical discharge machining. **Precision Engineering**, v. 33, n. 4, p. 459–465, 2009.

CHERN, G. L.; CHANG, Y. C. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 6, p. 659–666, 2006.

DIB, M. H. M. **Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento**. 140p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

DONG, X.; ZHANG, W.; SUN, J. The estimation of cutting force coefficients in milling of thin-walled parts using cutter with different tooth radii. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 1, p. 194–199, 2014.

DUONG, T. H. et al. A theoretical deformation prediction of micro channels in ultra-precision machining. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 14, n. 2, p. 173–181, 2013.

D'ADDONA, D. M.; RAYKAR, S. J.; NARKE, M. M. High Speed Machining of Inconel 718: Tool Wear and Surface Roughness Analysis. **Procedia CIRP**, v. 62, p. 269–274, 2017.

FILIZ, S. et al. An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 7–8, p. 1088–1100, 2007.

FONDA, P. et al. A study on the optimal fabrication method for micro-scale gyroscopes using a hybrid process consisting of electric discharge machining, chemical etching or micro-mechanical milling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1, p. 183–186, 2013.

FRIEDRICH, C. R.; COANE, P. J.; VASILE, M. J. Micromilling development and applications for microfabrication. v. 35, p. 367–372, 1997. HEIDARI, M.; YAN, J. Ultraprecision surface flattening of porous silicon by diamond turning. **Precision Engineering**, v. 49, p. 262–277, 2017.

FRIEDRICH, C. R.; VASILE, M. J. Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 5, n. 1, p. 33–38, 1996.

GIETZELT, T.; EICHHORN, L.; SCHUBERT, K. Manufacturing of microstructures with high aspect ratio by micromachining. **Microsystem Technologies**, v. 14, n. 9–11, p. 1525–1529, 2008.

HSIAO, T. C.; HUANG, S. C. The Effect of Cutting Process Parameters on the Stability in

Milling. **Advanced Materials Research**, v. 887–888, p. 1200–1204, 2014.

HUANG, P. L. et al. Cutting signals analysis in milling titanium alloy thin-part components and non-thin-wall components. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 9–12, p. 2461–2469, 2016.

JOHN, B. P. Scaling Down of Manufacturing Systems: Meso and Nano Level Machining - An Analysis. **M.S. Thesis, Pennsylvania State University**, n. December, p. 90, 2003.

KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 16, n. 4, p. 435–450, 2015.

KOLLURU, K.; AXINTE, D. Coupled interaction of dynamic responses of tool and workpiece in thin wall milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 9, p. 1565–1574, 2013.

KUMAR, S. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part B : Journal of Engineering Manufacture Fabrication of microchannels : A review. 2014. AURICH, J. C. et al. Burrs-Analysis, control and removal. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 2, p. 519–542, 2009

LAI, X. et al. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 1, p. 1–14, 2008.

LAURO, C. H. et al. Optimization of micro milling of hardened steel with different grain sizes

using multi-objective evolutionary algorithm. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 85, p. 88–99, 2016.

LAZOGLU, I.; MAMEDOV, A. Deformation of thin parts in micromilling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 117–120, 2016.

LEE, K.; DORNFELD, D. A. Micro-burr formation and minimization through process control. **Precision Engineering**, v. 29, n. 2, p. 246–252, 2005.

LI, G. H.; QI, H. J.; YAN, B. Finite Element Simulation Study of Cutting Process for Large Thin-Wall Part of Aluminum Alloy. **Key Engineering Materials**, v. 522, p. 62–67, 2012.

LIANG, Y. C. et al. Modeling and experimental analysis of microburr formation considering tool edge radius and tool-tip breakage in microend milling. **Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures**, v. 27, n. 3, p. 1531, 2009.

LISSEK, F. et al. Online-monitoring for abrasive waterjet cutting of CFRP via acoustic emission: Evaluation of machining parameters and work piece quality due to burst analysis. **Procedia Engineering**, v. 149, n. June, p. 67–76, 2016.

LIU, G. X. et al. Investigation of pulse electrochemical sawing machining of micro-inner annular groove on metallic tube. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 102, p. 22–34, 2016.

LLANOS, I. et al. Micromilling high aspect ratio features using tungsten carbide tools. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 228, n. 11, p. 1350–1358, 2014.

LONGHUI, M. Measurement of Surface Residual Stresses Generated by Turning Thin-Wall Ti6Al4V Tubes Using Different Cutting Parameters. **Rare Metal Materials and Engineering**, v. 44, n. 10, p. 2381–2386, 2015.

MALEKIAN, M.; PARK, S. S.; JUN, M. B. G. Modeling of dynamic micro-milling cutting forces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 7–8, p. 586–598, 2009.

MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, n. 2, p. 473–488, 2000.

MICHALIK, P. et al. Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 58, p. 416–428, 2014.

MIJUŠKOVIĆ, G.; KRAJNIK, P.; KOPAČ, J. Analysis of tool deflection in micro milling of graphite electrodes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 1–4, p. 209–217, 2013.

NAN, X.; XIE, L.; ZHAO, W. On the application of 3D finite element modeling for small-diameter hole drilling of AISI 1045 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 9–12, p. 1927–1939, 2016.

ODENDAHL, S.; KERSTING, P. Higher efficiency modeling of surface location errors by using a multi-scale milling simulation. **Procedia CIRP**, v. 9, p. 18–22, 2013.

OLIAEI, S. N. B.; KARPAT, Y. Experimental investigations on micro milling of stavax stainless steel. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 377–382, 2014.

OLVERA, D. et al. Improved predictions of the stability lobes for milling cutting operations of thin-wall components by considering ultra-miniature accelerometer mass effects. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 5–8, p. 2139–2146, 2016.

ÖZEL, T. et al. Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti-6Al-4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 85–88, 2011.

RATCHEV, S. et al. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 15, p. 1629–1641, 2004.

RATCHEV, S.; NIKOV, S.; MOUALEK, I. Material removal simulation of peripheral milling of thin wall low-rigidity structures using FEA. **Advances in Engineering Software**, v. 35, n. 8–9, p. 481–491, 2004.

RATCHEV, S.; LIU, S.; BECKER, A. A. **Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts**. Journal of Materials Processing Technology. 2005

REICHENBACH, I. G.; FALLENSTEIN, F.; AURICH, J. C. CAE Analysis of Single-Edge Micro End Mills – Methodology and Results. **Icomm**, n. D, p. 1–7, 2014.

REVEL, P.; KHANFIR, H.; FILLIT, R. Y. Surface characterization of aluminum alloys after diamond turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 178, n. 1–3, p. 154–161, 2006. PRAKASH, S.;

RODRÍGUEZ, P.; LABARGA, J. E. Tool deflection model for micromilling processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 1–4, p. 199–207, 2014.

SCIPPA, A.; GROSSI, N.; CAMPATELLI, G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 287–292, 2014.

SEARCH, H. et al. Micromilling of thin ribs with high aspect ratios. v. 115013, [s.d.].
DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. Recent advances in mechanical micromachining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 2, p. 745–768, 2006.

SEEMANN, K.; LEISTE, H.; BEKKER, V. A new generation of CMOS-compatible high frequency micro-inductors with ferromagnetic cores: Theory, fabrication and characterisation. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 302, n. 2, p. 321–326, 2006.

SEGUY, S. et al. Toolpath dependent stability lobes for the milling of thin-walled parts. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 4, n. 4, p. 377, 2008.

SEGUY, S.; DESSEIN, G.; ARNAUD, L. **Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interactions** **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2008.

SHAW, K. C. Ultra-precision machining of aluminium alloy surfaces for optical applications
Kui Liu *, Hu Wu , Peiling Liu and. v. 7, n. 2, p. 116–125, 2011.

SILVA, E. J. et al. Grinding process for profiled texturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 337–340, 2016.

SMITH, G. S. et al. Deformation machining - A new hybrid process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 281–284, 2007.

SRINIVASA, Y. V.; SHUNMUGAM, M. S. Mechanistic model for prediction of cutting forces in micro end-milling and experimental comparison. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 67, p. 18–27, 2013.

TAKEUCHI, Y. et al. Creation of ultra-precision microstructures with high aspect ratios. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 1, p. 107–110, 2006.

THEVENOT, V. et al. Integration of dynamic behaviour variations in the stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin-walled structure milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 7–8, p. 638–644, 2006.

TSAI, M.; TSAI, N.; YEH, C. Cutting torque feedback control for thin-wall conical workpieces. n. 1, p. 1177–1185, 2016. THEVENOT, V. et al. Influence of Material Removal on the Dynamic Behavior of Thin-Walled Structures in Peripheral Milling. **Machining Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 275–287, 2006.

UHLMANN, E.; SCHAUER, K. Dynamic load and strain analysis for the optimization of micro end mills. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, n. 1, p. 75–78, 2005.

VÁZQUEZ, E. et al. Swarm intelligent selection and optimization of machining system parameters for microchannel fabrication in medical devices. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 26, n. 3, p. 403–414, 2011.

WANG, S. et al. A study of the cutting-induced heating effect on the machined surface in ultra-precision raster milling of 6061 Al alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1–4, p. 69–78, 2010.

WANG, J. et al. Modeling the dependency of edge chipping size on the material properties and cutting force for rotary ultrasonic drilling of brittle materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 101, p. 18–27, 2016.

YANG, Y. H.; GUO, J. Y.; YU, C. Analysis to the Influences of Cutting Force to Machining Deformation of a Titanium Alloy Thin-Wall Tube. **Advanced Materials Research**, v. 366, p.

510–513, 2011.

ZHANG, J. et al. Review of micro/nano machining by utilizing elliptical vibration cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 106, p. 109–126, 2016.

ZHONG, Z. W.; LEONG, M. H.; LIU, X. D. The wear rates and performance of three mold insert materials. **Materials and Design**, v. 32, n. 2, p. 643–648, 2011.