

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Giuliano Terenzi de Bessa Pinto

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE BROCAS
ESPECIAIS NA FURAÇÃO DE CHAPAS FINAS AERONÁUTI-
CAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Especialidade Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Jefferson de Oliveira Gomes, Dr. Eng

Florianópolis

2010

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

P659a Pinto, Giuliano Terenzi de Bessa
Análise da influência da geometria de brocas especiais na
furação de chapas finas aeronáuticas [dissertação] / Giuliano
Terenzi de Bessa Pinto ; orientador, Rolf Bertrand Schroeter.
- Florianópolis, SC, 2010.
164 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Indústria aeronáutica.
3. Brocas - (Ferramenta). 4. Alumínio - Estruturas.
I. Schroeter, Rolf Bertrand. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. III. Título.

CDU 621

Giuliano Terenzi de Bessa Pinto

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE BROCAS
ESPECIAIS NA FURAÇÃO DE CHAPAS FINAS AERONÁUTICAS**

Esta Dissertação foi julgada adequado para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Especialidade Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Florianópolis, 13 de setembro de 2010

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Jefferson de Oliveira Gomes, Dr. Eng.
Coorientador
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D. Sc.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph. D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Universidade Federal de Santa Catarina

Ao meu pai Nelson Tinoco

AGRADECIMENTOS

Ao professor Rolf Bertrand Schroeter, pela orientação, por todos os ensinamentos passados ao longo deste trabalho, pela seriedade e compromisso com que se dedica a seu trabalho. Seu exemplo de caráter e sua amizade serão, sem dúvida, marcantes.

Ao professor Walter Lindolfo Weingaertner, por todo o incentivo e apoio desde o início e por todo o seu esforço dedicado permitindo a participação deste mestrando em um projeto entre LMP-CCM-EMBRAER.

Ao professor Jefferson de Oliveira Gomes, por permitir que grande parte da pesquisa fosse conduzida no laboratório CCM-ITA. Por todo seu apoio como coorientador e ensinamentos transmitidos.

Ao professor Gonzaga, coordenadores do projeto AME, por possibilitar as pesquisas no projeto LAME e por viabilizar os contatos diretos com a Equipe Embraer.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão, que graças à sua estrutura, à sua equipe e à sua grande experiência acumulada em usinagem permitiu que esta pesquisa fosse realizada. À equipe do laboratório em especial aos colegas Bruno, Eduardo e Daniel Fontan, pela amizade e disposição em ajudar em todos os momentos e ao suporte indiscutível para a realização desta pesquisa.

Ao Centro de Competência em Manufatura, por possibilitar a realização dos testes deste trabalho. À toda a equipe deste laboratório, que foram verdadeiros colegas e amigos possibilitando essa pesquisa.

À Empresa Embraer, que forneceu as informações e foi realmente uma empresa parceira durante toda esta pesquisa. Em especial ao Simonetti, Emilio, Diego, Fred e Davi e tantos outros que colaboraram com este projeto.

À Iscar do Brasil, por fabricar as brocas e fornecê-las com prontidão, em especial ao Maurício por todo seu apoio e envolvimento no projeto.

Ao laboratório de metrologia do IFI sem o qual a parte metrológica deste trabalho não seria possível e a toda a sua equipe.

Ao meu pai que gostaria de acompanhar o fim deste trabalho, à minha mãe, meu irmão Marco, à Larissa, Mateuzinho, ao Alysso e aos familiares e amigos, que me apoiaram em todo momento. A Deus, aquele que em tudo me apoiou.

RESUMO

Na indústria aeronáutica a implementação de sistemas automatizados de fabricação vem exigindo processos de fabricação cada vez mais eficientes com o mínimo de intervenções por parte dos operadores. Atualmente o processo de furação vem sendo realizado com maior frequência por robôs ou máquinas especiais em vários segmentos da indústria aeronáutica. Uma das grandes dificuldades em se automatizar completamente este processo no setor aeroespacial se deve à formação de rebarbas durante a furação de chapas de alumínio, que é um material largamente utilizado neste setor. A presença de rebarbas requer a interferência humana pois são necessárias etapas de desmontagem, limpeza de cavacos e rebarbas e remontagem. Não sendo removidas, as rebarbas promovem mau assentamento de partes, pontos de concentração de tensão e corrosão. A etapa de rebarbação e limpeza, que não agrega valor ao produto, impede o trabalho contínuo do robô e é responsável por grande parte do tempo de produção. Outro problema recorrente se deve a processos inadequados de furação que promovem flexões excessivas das chapas de revestimento de aeronaves gerando furos com erros de forma. Este trabalho está voltado para o estudo de geometrias de brocas afim de, gerar o mínimo de rebarbas durante a usinagem de chapas finas de alumínio, de acordo com padrões aeronáuticos. O desenvolvimento das geometrias também visa a redução da flexão das chapas a fim de evitar o espaçamento entre as mesmas, o acúmulo de cavacos e consequentemente a etapa de limpeza. Com este intuito foram desenvolvidas brocas com geometrias especiais, variando-se o projeto da ponta e o ângulo de hélice. Para avaliar o desempenho do processo, as brocas foram testadas com diferentes parâmetros de corte e comparadas com uma broca convencionalmente utilizada na indústria aeronáutica. Para análise do desempenho foram utilizados os parâmetros altura de rebarba, força de avanço, momento torçor e a flexão das chapas.

Palavras chave: peças aeronáuticas, brocas especiais, furação, rebarba, seções de fuselagem, chapas de alumínio.

ABSTRACT

In the aerospace industry the implementation of automated manufacturing systems requires efficient manufacturing processes with less human intervention. Nowadays the drilling process has been more frequently done by robots or special machines in the aerospace industry. One of the challenges in completely automating this process in aircraft manufacturing is the burr formation when drilling aluminum sheets, a material largely applied in this area. The presence of burrs requires human intervention due the necessity of disassembling, deburring, chips removal and reassembling. If the burr are not removed, they produce a bad positioning and fitting of the assembled parts, stress points and areas susceptible to corrosion. Deburring and cleaning do not increase the value of the final product, increase the time consuming and do not allow the robot to work continuously. Another issue in drilling airplane parts is the exceeding deformation of the sheets (aircraft skins) due to inadequate drilling processes what may result in holes with geometrical deviation. This work is focused on the study of drill geometries willing a minimal burr formation during the machining of thin aluminum sheets according to aeronautical standards. The drill geometry design also objectives reducing the sheets deformation avoiding the gap formation between then and the chip accumulation, becoming the cleaning stage unnecessary. Attempting for this objectives, drills with special geometries were developed, where different drill point designs and helix angles were tested. To evaluate the performance of each drill, tests with different cutting parameters were conducted and the results compared with others obtained with a conventional drill current in use in the aerospace industry. As a performance analysis the parameters burr height, force in the feed direction, momentum and sheet deformation were evaluated.

Keywords: *aeronautical parts, special drills, drilling, burr, fuselage segments, aluminum sheets.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Aeronave com detalhe das superfícies de comando	30
Figura 2.2: (a) Chapa de alumínio plana e (b) chapa de alumínio curvada	31
Figura 2.3: (a) Painel recortado com janelas e (b) painel recoberto com <i>primer</i>	31
Figura 2.4: (a) Conjunto de quatro painéis e (b) o segmento da fuselagem	32
Figura 2.5: Montagem dos segmentos formando a fuselagem.....	33
Figura 2.6: Alinhamento e nivelamento dos segmentos para junção	33
Figura 2.7: Junta orbital composta dos dois segmentos e da cinta orbital	33
Figura 2.8: Chapas sobrepostas no início da furação	34
Figura 2.9: Chapas com flexão devido aos esforços da furação	35
Figura 2.10: Broca perfurando a primeira chapa e início da usinagem da segunda.....	35
Figura 2.11: Broca perfurando a segunda chapa resultando em rebarbas entre as chapas e na saída do segundo furo	36
Figura 2.12: Formação de rebarba em camadas sobrepostas (a) rebarba completamente desenvolvida, (b) rebarba da saída do primeiro furo toca a rebarba da entrada do segundo furo, (c) semelhante a (b) porém a rebarba da saída tem maior crescimento e se deforma ao tocar a rebarba da entrada ...	37
Figura 2.13: Furação com saída da broca pela superfície curvada de uma peça.....	39
Figura 2.14: Furação em posições estratégicas do pacote com brocas de 2,5mm para passagem do prendedor provisório (pontos em branco são aqueles onde os prendedores são colocados e os pontos escuros aqueles a serem furados em etapas subsequentes)	40
Figura 2.15: Posicionamento dos prendedores provisórios e furação do pacote para alocação dos rebites.....	41
Figura 2.16: (a) Desmontagem do conjunto para limpeza das rebarbas e cavacos e (b) aplicação do selante de interface para evitar corrosão entre as chapas	41
Figura 2.17: Conjunto rebitado com o selante de interface entre as chapas	42

Figura 2.18: Aproximação da ferramenta ao ponto por onde esta sai pela peça com a formação do plano negativo de cisalhamento AB	45
Figura 2.19: Avanço da ferramenta e formação da rebarba.....	45
Figura 2.20: Imagem obtida com microscópio de varredura representando a formação da rebarba em corte ortogonal quando a ferramenta esta prestes a sair da peça	46
Figura 2.21: (a) Formação da rebarba no Al 2024 T4 e (b) formação da rebarba no Al 6061 T6	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.22: Padrões utilizados para medição de rebarbas	48
Figura 2.23: Tipos de formação de rebarba	48
Figura 2.24: Tipos de rebarba Poisson, Curvada e Rasgada.....	49
Figura 2.25: Partes básicas de uma broca helicoidal	54
Figura 2.26: Detalhes da ponta de uma broca helicoidal convencional	54
Figura 2.27: Aumento do núcleo da broca ao longo do corpo desta com detalhe das seções transversais nos pontos X-X e Y-Y....	55
Figura 2.28: Tipos especiais de afiação para redução do gume transversal	59
Figura 2.29: Formação das rebarbas tipo uniforme, uniforme com “chapéu” e rebarba tipo coroa.....	61
Figura 2.30: Tipos de rebarba encontrados na furação de titânio Ti-6Al-4V	62
Figura 2.31: Alteração do raio de quina da ferramenta para variação no ângulo de ponta	62
Figura 2.32: Broca com ponta chanfrada.....	63
Figura 2.33: Influência do ângulo de chanfro sobre a rigidez do material na saída da broca pelo furo.....	64
Figura 2.34: Broca com quinas arredondadas.....	65
Figura 2.35: Influência do raio da quina da broca sobre a rigidez do material durante a saída da broca	65
Figura 2.36: Broca escalonada.....	66
Figura 2.37: Influência do ângulo do escalonado sobre a rigidez do material da peça na saída da broca.....	67
Figura 2.38: Detalhes de uma broca de centragem.....	68
Figura 2.39: Saída da broca tipo de centragem com detalhe do material a ser usinado.....	69
Figura 2.40: Ângulo de direção do gume e forças de usinagem.....	70
Figura 2.41: Influência do ângulo de posição do gume principal em brocas com ponta de centragem sobre as forças na furação	70

Figura 2.42: Influência do ângulo de posição do gume principal em brocas com ponta de centragem sobre as forças na furação	71
Figura 3.1: Corpo de prova com os furos para fixação.....	73
Figura 3.2: Dispositivo para a fixação dos corpos de prova	74
Figura 3.3: Montagem dos corpos de prova sobre dispositivo de fixação	75
Figura 3.4: Furação para pontos de fixação e furos realizados em teste	75
Figura 3.5: Vista (a) lateral e (b) frontal da Broca EMB	76
Figura 3.6: (a) Distância (d_p) entre a ponta da broca e a quina e (b) ângulo de hélice.....	77
Figura 3.7: Centro de usinagem vertical Romi D800	78
Figura 3.8: Sensor com a placa de proteção para ensaios de fresamento	80
Figura 3.9: Amplificador de sinais Kistler 5070 A	80
Figura 3.10: Esquema da montagem para realização dos testes	81
Figura 3.11: Montagem do sistema de medição para avaliação da altura de rebarbas.....	82
Figura 3.12: Máquina de medir por coordenadas Mitutoyo Crysta C 7106.....	83
Figura 3.13: Sequência dos furos realizados nos ensaios.....	85
Figura 3.14: (a) Gráfico da resposta da força pelo tempo para os seis furos de cada teste e (b) com seleção de faixa útil	86
Figura 3.15: Pontos medidos para avaliar a deflexão das chapas	87
Figura 3.16: Deflexão das chapas para dois valores de avanço com a mesma broca e mesma velocidade de corte.....	87
Figura 3.17: Pontos de medição de altura de rebarba ao longo dos furos na entrada e na saída das chapas superiores e inferiores ..	88
Figura 3.18: Ponto de zeragem do apalpador eletrônico.....	89
Figura 4.1: Distribuição F.....	92
Figura 4.2: Gráfico de altura de rebarba para diferentes valores de avanço e velocidade de corte.....	94
Figura 4.3: Gráfico de variação da altura de rebarba para diferentes velocidades de corte e diferentes avanços	95

Figura 4.4: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=150$ m/min	97
Figura 4.5: Variação da força na direção de avanço para diferentes valores de avanço e de velocidade	99
Figura 4.6: Variação do momento para diferentes valores de avanço e de velocidade.....	100
Figura 4.7: Gráfico da altura de rebarba na saída da chapa inferior para a variação do avanço e da velocidade de corte.....	102
Figura 4.8: Variação do momento para diferentes valores de avanço e de velocidade.....	104
Figura 4.9: Gráfico da altura de rebarba na entrada da chapa superior para a variação do avanço e da velocidade de corte.....	105
Figura 4.10: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=150$ m/min.....	107
Figura 4.11: Gráfico das forças na direção de avanço para diferentes avanços e velocidades de corte	108
Figura 4.12: Gráfico da altura de rebarba na saída da chapa inferior para a variação do avanço e da velocidade de corte.....	111
Figura 4.13: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=125$ m/min.....	112
Figura 4.14: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=175$ m/min.....	115
Figura 4.15: Gráfico da força na direção de avanço para diferentes valores de avanço e velocidade de corte	116
Figura 4.16: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=175$ m/min.....	118
Figura 4.17: Gráfico da força na direção de avanço para diferentes valores de avanço e velocidade de corte	119
Figura 4.18: Comparação da altura de rebarbas entre as brocas para diferentes avanços para $v_c= 175$ m/min	122
Figura 4.19: Altura de rebarba para as várias brocas com diferentes avanços à velocidade de 150m/min na entrada da chapa inferior.....	123

Figura 4.20: Furação de materiais frágeis sem e com a presença de materiais de suporte.....	124
Figura 4.21: Altura de rebarba para as diferentes brocas variando o avanço, mantendo-se $v_c=150\text{m/min}$ analisando a saída da chapa superior	125
Figura 4.22: Altura de rebarba na entrada da chapa superior para $v_c=150\text{m/min}$ variando o avanço.....	126
Figura 4.23: Comparação das forças em z para as diferentes brocas variando-se o avanço e mantendo-se $v_c=125\text{m/min}$	128
Figura 4.24: Comparação das forças em z para as diferentes brocas variando-se o avanço e mantendo-se $v_c=150\text{m/min}$	128
Figura 4.25: Comparação das forças em z para as diferentes brocas variando-se o avanço e mantendo-se $v_c=150\text{m/min}$	129
Figura 4.26: Formação da rebarba na entrada da chapa superior.....	129
Figura 4.27: Formação da rebarba na saída da chapa inferior acumulada em regiões do furo.....	130
Figura 4.28: Formação da rebarba na entrada da chapa inferior.....	131
Figura 4.29: Rebarba tipo “chapéu” feita com a broca de ponta de centragem com d_p positiva	132
Figura 4.30: Rebarba tipo “chapéu” feita com a broca de ponta de centragem com d_p nula	132
Figura 4.31: Rebarba tipo “chapéu” aderida à saída do furo feita com a broca EMB	133
Figura 4.32: Rebarba tipo “chapéu” totalmente destacada feita com a broca EMB	133
Figura 4.33: Gráfico da força de avanço com a broca de ponta centragem ($\delta = 45^\circ$, d_p positiva) para furação de duas chapas sobrepostas com altas taxas de aquisição (tempo em segundos e força em Newtons).....	134
Figura 4.34: Gráfico da força de avanço com a broca EMB para furação de duas chapas sobrepostas com altas taxas de aquisição (tempo em segundos e força em Newtons).....	135
Figura 4.35: Gráfico da força de avanço com a broca de ponta centragem ($\delta = C$, d_p nula) para furação de duas chapas sobrepostas com altas taxas de aquisição (tempo em segundos e força em Newtons).....	136
Figura 4.36: Deformação das chapas para as diferentes brocas $v_c=175\text{m/min}$ e $f=0,1$ medidos na faixa 4.....	137

Figura 4.37: Deformação medida ao longo da faixa 4 para a broca 2 levando em conta a variação do avanço medido em 25 pontos ao longo da faixa	137
Figura 4.38: Deformação medida ao longo da faixa 4 para a broca 1 levando em conta a variação do avanço medido em 25 pontos ao longo da faixa	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição da liga Al 2024	73
Tabela 3.2: Variações das geometrias das brocas	77
Tabela 3.3: Especificações técnicas da máquina-ferramenta	78
Tabela 3.4: Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante	84
Tabela 4.1: ANOVA da entrada da chapa superior para a broca 1	92
Tabela 4.2: ANOVA da saída da chapa superior para a broca 1	93
Tabela 4.3: ANOVA $v_c=125\text{m/min}$ chapa/altura (h_0) broca1	96
Tabela 4.4: ANOVA $v_c=125\text{m/min}$ posição/altura(h_0) broca1	96
Tabela 4.5: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca1	97
Tabela 4.6: Broca 2, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)	101
Tabela 4.7: ANOVA posição/altura (h_0) e chapa/posição Broca 2	103
Tabela 4.8: ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força.....	103
Tabela 4.9: Broca 3, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)	105
Tabela 4.10: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca 3 ..	106
Tabela 4.11: Broca 3, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força.....	107
Tabela 4.12: Broca 4, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)	109
Tabela 4.13: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca 4 ..	109
Tabela 4.14: Broca 4, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força.....	110
Tabela 4.15: Broca 5, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)	110
Tabela 4.16: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca 5 ..	112
Tabela 4.17: Broca 5, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força.....	113
Tabela 4.18: Broca 6, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)	114
Tabela 4.19: ANOVA posição/altura (h_0) e chapa/posição Broca 6 ..	114
Tabela 4.20: Broca 6, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força.....	115
Tabela 4.21: Broca EMB, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)	116

Tabela 4.22: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca EMB	117
Tabela 4.23: Broca EMB, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força.....	119
Tabela 4.24: ANOVA correlação ente parâmetro geometria de broca utilizado e altura de rebarba	120
Tabela 4.25: ANOVA correlação entre o parâmetro geometria de broca utilizado com a força e o momento	127

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α	[°]	ângulo de incidência
α_e		intervalo de confiança
β_0	[°]	ângulo negativo de deformação
γ	[°]	ângulo de saída
δ	[°]	ângulo de hélice
σ	[°]	ângulo de ponta
σ_1	[°]	ângulo de ponta inicial
σ_2	[°]	ângulo de ponta secundário
τ	[°]	ângulo auxiliar da ponta da broca
φ	[°]	ângulo de hélice
χ	[°]	ângulo de posição da ferramenta
χ_0	[mm]	distância do cavaco deformado até a saída da peça
ψ	[°]	ângulo do gume transversal
Φ	[°]	ângulo de cisalhamento
a_p	[mm]	profundidade de corte
b	[mm]	largura de corte
b_g	[mm]	espessura da rebarba
b_r	[mm]	espessura na raiz da rebarba
d_e	[mm]	distância do escalonado
d_p	[mm]	distância da ponta à quina da broca
f	[mm]	avanço
h	[mm]	espessura de corte
h_0	[mm]	altura de rebarba
h_r	[mm]	distância entre a superfície usinada e ponto de pivotamento
r_f	[mm]	raio da raiz da rebarba
t_0	[mm]	espessura de cavaco não deformada
x_2		constantes empíricas do material da peça
y_2		constantes empíricas do material da peça
C_2		constantes empíricas do material da peça
D_1	[mm]	diâmetro menor
D_2	[mm]	diâmetro maior

F		valor da distribuição F
F_{ct}		valor de corte para distribuição F
F_f	[N]	força de avanço
F_p	[N]	força passiva
F_t	[N]	soma das componentes de F_f e F_p
K		fator de abrangência
L	[mm]	distância da ponta da ferramenta à saída da peça
$R\epsilon$	[mm]	raio de quina da ferramenta
AB		plano negativo de deformação
CAD		Computer Aided Design
GL		grau de liberdade
H_o		hipótese nula
MEV		Microscópio Eletrônico de Varredura
MMC		Máquina de Medir por Coordenadas
MQ		media dos quadrados
P		parâmetro de ANOVA
SQ		soma dos quadrados

SUMÁRIO

1. Introdução.....	27
2. Estado da arte	29
2.1 Furação na Indústria Aeronáutica.....	29
2.1.1 Etapas de montagem da fuselagem de uma aeronave	29
a) Conformação, corte e tratamento da superfície das chapas	31
b) Montagem dos segmentos da fuselagem.....	32
c) Emenda dos segmentos da fuselagem.....	32
2.1.2 Problemas na furação de fuselagens	34
a) Chapas sobrepostas	34
b) Chapas curvadas.....	38
c) Fixação provisória das chapas.....	40
d) Aplicação de selante e rebagem.....	41
2.2 Rebarbas.....	42
2.2.1 Definição.....	42
2.2.2 Problemas com a presença de rebarbas.....	43
2.2.3 Mecanismos de Formação de Rebarbas	44
2.2.4 Formas de Rebarbas	47
2.2.5 Medição de Rebarbas	49
a) Métodos destrutivos de medição.....	50
b) Sistemas mecânicos	50
c) Sistemas ópticos.....	51
2.3 O Processo de Furação	51
2.3.1 Brocas helicoidais	52
2.3.2 Formação de rebarba na furação com brocas helicoidais.....	59
a) Mecanismos de formação de rebarbas e formas de rebarba na furação	60
2.3.3 Geometrias especiais de brocas para reduzir a formação de rebarbas.....	63
a) Brocas chanfradas	63
b) Brocas com quina arredondada	64
c) Brocas escalonadas	65
d) Brocas com ponta de centragem	67
3. Materiais e Métodos	73
3.1 Materiais, ferramentas e máquinas.....	73
3.1.1 Corpos de prova	73

3.1.2	Dispositivos de fixação.....	74
3.1.3	Ferramentas de corte.....	75
a)	Broca convencional	76
b)	Brocas especiais.....	76
3.1.4	Máquina - ferramenta	78
3.2	Sistemas de Medição.....	79
3.2.1	Sistema de aquisição de forças	79
a)	Sensor de medição com placa de proteção para fresamento	79
b)	Amplificador de sinais e cabo de sinais.....	80
c)	Placa de aquisição de dados.....	80
3.2.2	Medição de altura de rebarbas	81
3.2.3	Medição da flexão	83
3.3	Ensaio de usinagem e medições	84
3.3.1	Planejamento de experimentos	84
3.3.2	<i>Setup</i> do sistema de aquisição de forças e momentos	85
3.3.3	Medição da deformação (flexão).....	86
3.3.4	Medição da altura de rebarba.....	88
4.	Análise e Discussão dos Resultados.....	91
4.1	Análise Individual da Furação com Diferentes Brocas	91
4.1.1	Broca 1 ($\delta=15^\circ$, d_p positiva).....	91
a)	Altura de Rebarba	91
b)	Força de avanço e momento	98
4.1.2	Broca 2 ($\delta=15^\circ$, d_p nula)	101
a)	Altura de Rebarba	101
b)	Força de avanço e momento	103
4.1.3	Broca 3 ($\delta=30^\circ$, d_p positiva).....	104
a)	Altura de Rebarba	104
b)	Força de avanço e momento	107
4.1.4	Broca 4 ($\delta=30^\circ$, d_p nula)	108
a)	Altura de Rebarba	108
b)	Força de avanço e momento	110
4.1.5	Broca 5 ($\delta=45^\circ$, d_p nula)	110
a)	Altura de Rebarba	110
b)	Força de avanço e momento	113
4.1.6	Broca 6 ($\delta=45^\circ$, d_p nula)	113
a)	Altura de Rebarba	113
b)	Força de avanço e momento	115
4.1.7	Broca EMB ($\delta=30^\circ$).....	116

a)	Altura de Rebarba	116
b)	Força de avanço e momento	118
4.2	Comparação entre Furos Obtidos com Diferentes Brocas.....	120
4.2.1	Saída chapa inferior	121
4.2.2	Entrada Chapa Inferior.....	121
4.2.3	Saída chapa superior	123
4.2.4	Entrada chapa superior.....	125
4.2.5	Forças na furação	127
5.	Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos.....	139
5.1	Conclusões	139
5.2	Sugestões para Próximos Trabalhos.....	142
6.	Referências	145

1. INTRODUÇÃO

Na indústria aeronáutica o processo de furação vem sendo foco de estudos com maior frequência, uma vez que uma aeronave de grande porte pode conter milhões de furos. Com o intuito de reduzir custos, uma das abordagens que vem sendo utilizada é a de furação *onestep*, na qual é reduzida a quantidade de etapas de usinagem necessárias. Atualmente são empregadas brocas de diferentes diâmetros na produção de um único furo até se atingir o diâmetro final desejado. O processo *onestep* visa não somente reduzir as operações de furação, mas eliminar a abertura de componentes e a desmontagem de partes feitas atualmente para remoção de cavacos e rebarbas remanescentes.

Na montagem de aeronaves, a furação *onestep* é cada vez mais utilizada principalmente na emenda de segmentos de fuselagem. Nesta fase de montagem, o fato da usinagem ser realizada em chapas finas impõe dificuldades à implementação da furação automatizada. As chapas finas de alumínio, sobrepostas umas às outras, tendem a defletir e rebarbas e cavacos são formados entre as chapas durante a furação. Em aeronaves, a eliminação de cavacos e rebarbas entre as chapas de uma junção de segmentos não é um fator meramente estético ou de limpeza. A presença de cavacos e rebarbas propicia o surgimento de corrosão e concentração de tensão que durante os vários ciclos de trabalho da fuselagem podem resultar em ruptura da mesma por fadiga. Ainda, a aplicação do selante na interface entre as duas chapas só é possível de ser realizada se não existirem rebarbas e sujeiras entre as mesmas.

Desta maneira, o processo de furação *onestep* torna-se pré-requisito para a automação da montagem de segmentos de aeronaves, uma vez que este permite que um furo seja realizado com uma única ferramenta em uma única etapa. Além disso, elimina-se a fase de desmontagem para limpeza e rebarbação e a fase de remontagem das chapas que impedem a automação completa do processo. Feito isso é possível a pré-montagem do conjunto (chapas sobrepostas) já com o selante aplicado na interface entre as duas chapas, sendo a furação realizada após a cura do selante. Essa sequência de processos só é possível se a furação com as brocas helicoidais não promover o descolamento do selante.

Para atingir tais requisitos este trabalho tem como objetivo desenvolver brocas especiais para furação de chapas finas aeronáuticas capazes de reduzir ao mínimo a formação de rebarbas nos furos e gerar

níveis de força de avanço aceitáveis, a fim de evitar a flexão das chapas furadas.

No desenvolvimento das geometrias de brocas será verificada a influência do tipo de ponta da ferramenta e do ângulo de hélice da mesma sobre as forças axiais, flexões das chapas e alturas de rebarbas geradas durante a usinagem.

Neste trabalho será apresentada uma revisão teórica sobre rebarbas, suas principais características, sendo posteriormente abordados os mecanismos de sua formação em processos de furação com brocas helicoidais. Será também analisada a furação com diferentes ferramentas visando atingir o processo otimizado.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Furação na Indústria Aeronáutica

No setor aeronáutico a furação é uma das operações de usinagem mais comuns, sendo que a quantidade de furos em uma aeronave pode ultrapassar 1,3 milhões [1, 2, 3]. Além da grande quantidade, os furos são realizados em locais diferentes, às vezes de difícil acesso e englobando uma gama considerável de materiais, o que torna complicada a automação completa dos processos de furação. Na indústria aeronáutica, diferentemente de muitos outros setores, várias operações de montagem e fabricação ainda são feitas manualmente. No entanto a corrida generalizada pela automação, também presente na aeronáutica, faz com que uma dedicação especial seja dada à automação dos processos de fabricação em aeronaves [4].

Atualmente, a furação automatizada do revestimento das aeronaves vem sendo foco de estudos, tanto no que diz respeito aos subconjuntos de segmentos de fuselagem quanto em etapas de montagem final (emenda de segmentos formando a fuselagem). Na etapa de montagem destas seções a furação é feita em duas camadas (painéis de revestimento sobrepostos aos reforçadores ou painéis sobrepostos às cintas). Estas diferentes partes são mantidas na posição desejada por dispositivos provisórios de fixação, sendo este assunto melhor abordado nos próximos tópicos.

2.1.1 Etapas de montagem da fuselagem de uma aeronave

Um avião normalmente utilizado na aviação civil é composto basicamente de uma fuselagem, superfícies de sustentação, estabilização e de comando e sistema de propulsão. Além da asa, que é a maior responsável pela sustentação, a maioria das aeronaves possui superfícies estabilizadoras verticais e horizontais que são denominadas empenagens. Para movimentação em voo existem superfícies móveis (superfícies de comando) situadas nas asas e empenagens que permitem ao avião girar em torno de três eixos (Figura 2.1), realizando as três manobras básicas denominadas arfagem, guinada e rolamento. Nas asas as superfícies responsáveis pelo rolamento são os ailerons, na empenagem vertical o leme permite a guinada e na empenagem horizontal o profundor realiza

a arfagem. Existem ainda as superfícies auxiliares ou secundárias de comando que são os *flaps*, freios aerodinâmicos, *spoilers*, *slats*, *winglets*, compensadores, dentre outros. Estas superfícies possibilitam ao avião ter sua velocidade reduzida durante o voo, mudar seu ângulo de descida, ter sua sustentação elevada, alterar o escoamento sobre a asa reduzindo o arrasto, dentre inúmeros outros fatores que permitem à aeronave realizar um voo controlado e estável.

A fuselagem, onde as pessoas são alocadas, precisa apresentar condições para ser habitada mesmo a altitudes elevadas onde a falta de oxigênio e a diferença de pressão são acentuadas [3]. Esta parte importante da aeronave é basicamente constituída de uma estrutura metálica, recoberta por chapas metálicas, formando um conjunto capaz de resistir aos esforços de trabalho em voo e às diferenças de pressão entre a cabine e a atmosfera.

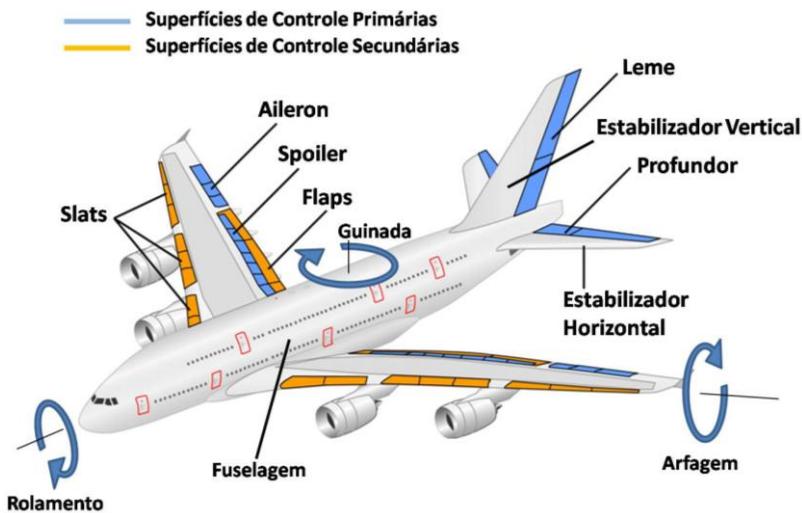


Figura 2. 1: Aeronave com detalhe das superfícies de comando

Durante a fabricação do avião, chapas e estruturas de vigas são montadas em pequenas seções ou painéis e em seguida encaixados uns aos outros. Formam-se assim anéis, que fixados entre si geram a fuselagem completa. A seguir são descritas estas etapas de fabricação.

a) Conformação, corte e tratamento da superfície das chapas

Inicialmente as chapas de alumínio [5] que serão utilizadas como revestimento (painéis ou *skins*) são curvadas por um processo de calandragem até chegarem ao raio correto especificado em projeto (Figura 2.2).

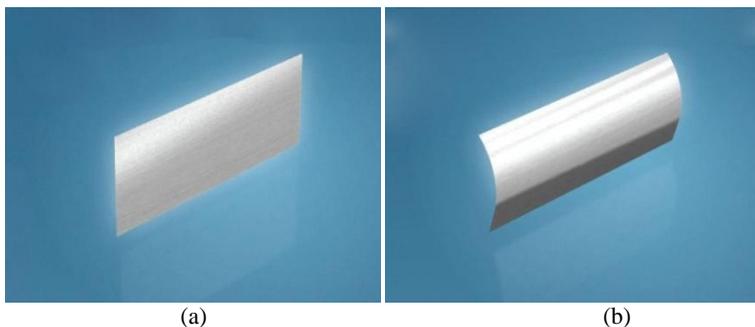


Figura 2. 2: (a) Chapa de alumínio plana e (b) chapa de alumínio curvada

Os painéis são então cortados e ajustados formando-se as janelas, portas e outras necessidades. Em seguida estes recebem um tratamento de superfície com uma camada especial, denominada *primer* que será responsável por evitar a corrosão das chapas (Figura 2.3).

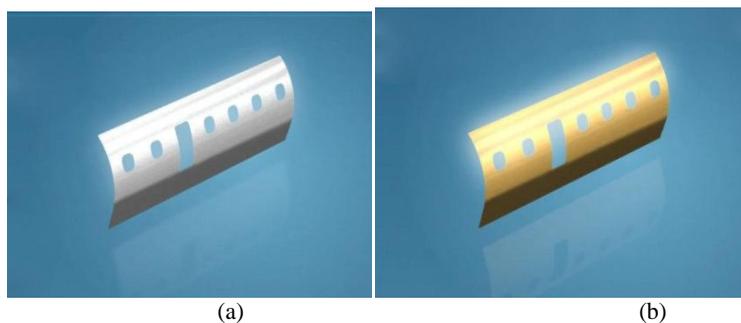


Figura 2. 3: (a) Painel recortado com janelas e (b) painel recoberto com *primer*

b) Montagem dos segmentos da fuselagem

Os segmentos de fuselagem são geralmente resultados da emenda de quatro conjuntos de painéis. Estes painéis são ligados à parte estrutural composta de reforçadores longitudinais (*stringers*) e reforçadores transversais (cavernas ou *frames*) (Figura 2.4). Essa ligação entre as chapas e os reforçadores é feita principalmente por meio de rebites e pinos.

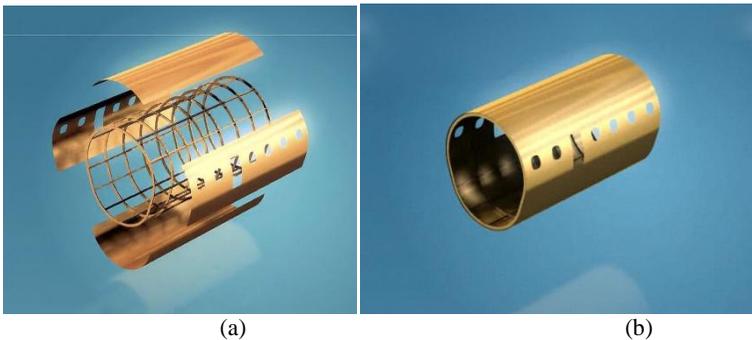


Figura 2. 4: (a) Conjunto de quatro painéis e (b) o segmento da fuselagem

c) Emenda dos segmentos da fuselagem

Feita a montagem dos segmentos da fuselagem individualmente, é necessário uni-los para formar a fuselagem final (Figura 2.5 e 2.7).

Durante a emenda dos segmentos é necessário realizar um complicado processo de alinhamento entre estes. Esta etapa envolve estruturas com grandes volumes, mas exige pequenos erros e desvios. A tarefa de alinhamento pode ser feita através de suportes reguláveis manualmente ou por meio de sistemas automatizados (Figura 2.6).



Figura 2. 5: Montagem dos segmentos formando a fuselagem

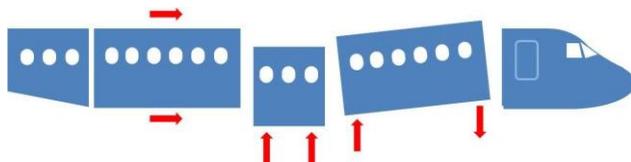


Figura 2. 6: Alinhamento e nivelamento dos segmentos para junção

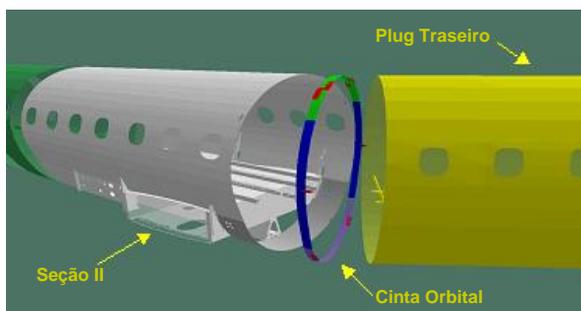


Figura 2. 7: Junta orbital composta dos dois segmentos e da cinta orbital

A furação, fixação provisória e rebitagem da cinta ao revestimento da fuselagem requerem uma atenção maior, sendo que os problemas envolvidos nesta etapa são foco deste estudo, principalmente no que diz respeito à furação. Com essa motivação é feita a seguir uma introdução

sobre os principais problemas envolvidos nesta etapa de furação e junção de segmentos da fuselagem.

2.1.2 Problemas na furação de fuselagens

a) Chapas sobrepostas

Quando se pensa na furação do conjunto cinta orbital e revestimento da fuselagem, pode-se simplificar o problema para um caso de usinagem de duas chapas sobrepostas, que é uma situação muito comum na fabricação de aeronaves [1, 6, 7, 8]. As etapas e dificuldades envolvidas nesta questão são apresentadas a seguir.

Inicialmente a broca toca a primeira chapa usinando sua superfície (Figura 2.8) e à medida em que avança na direção do vetor f formam-se rebarbas na entrada do furo. Isso pode ser confirmado em estudo realizado [6], onde foi feita uma análise por elementos finitos na usinagem de duas chapas de aço inoxidável ABNT 304.

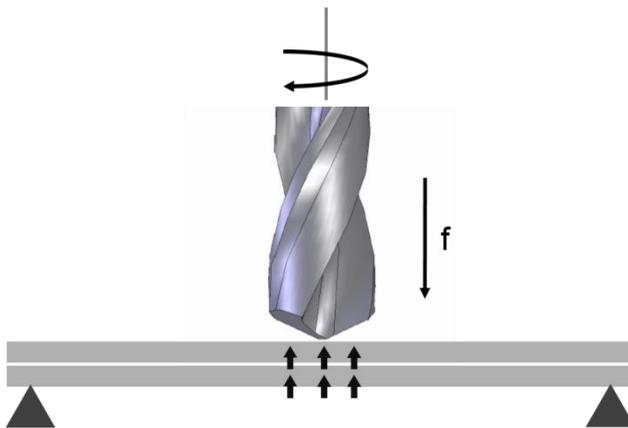


Figura 2. 8: Chapas sobrepostas no início da furação

Avançando ainda mais na direção do vetor f , a broca começa a causar a flexão do conjunto formado pelas duas chapas. É importante ressaltar que até este momento ambas as chapas resistem ao avanço da ferramenta (Figura 2.9).

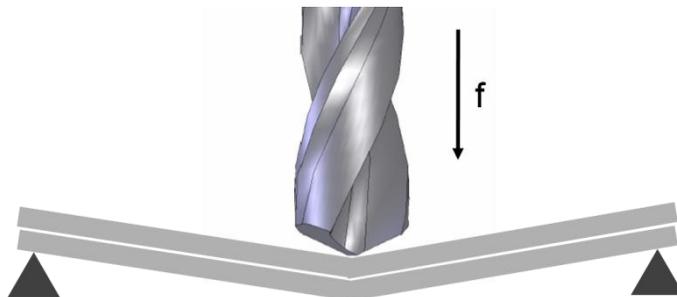


Figura 2. 9: Chapas com flexão devido aos esforços da furação

Ao se aproximar da saída do primeiro furo o material restante a ser usinado à frente da broca apresenta baixa capacidade de resistir às forças de avanço. Este material começa então a se romper e a primeira chapa começa a voltar à sua posição original (Figura 2.10). Quando a broca atravessa completamente a primeira chapa esta irá retornar completamente à sua posição inicial, caso não tenham ocorrido deformações plásticas na chapa como um todo. A saída da broca pela primeira chapa geralmente implica em formação de rebarbas na saída do furo. Logo em seguida tem início a usinagem da segunda chapa, que nesta etapa suporta toda a força de avanço que antes era dividida pelas duas chapas. De maneira similar ao ocorrido na primeira chapa, no início da furação da segunda chapa formam-se rebarbas na entrada do furo [6].

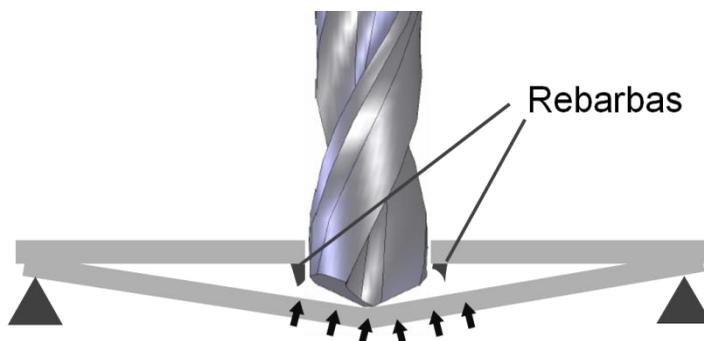


Figura 2. 10: Broca perfurando a primeira chapa e início da usinagem da segunda

Enquanto a segunda chapa é usinada ocorre um acúmulo de cavacos entre as duas chapas. Devido a este fator e à formação de rebarbas entre as chapas, a segunda chapa está flexionada se comparada à primeira que retornou à sua posição inicial. Ao atravessar a segunda chapa a broca forma rebarbas na saída do segundo furo (Figura 2.11).

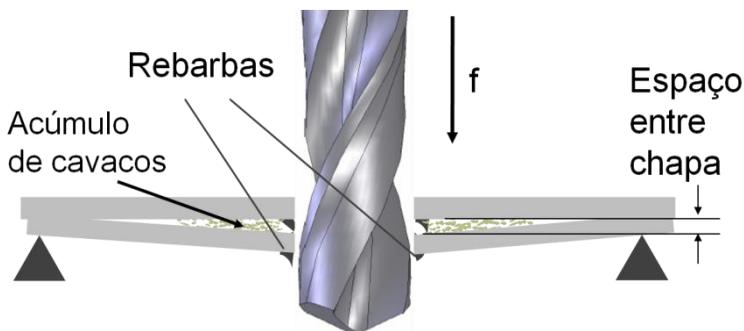


Figura 2. 11: Broca perfurando a segunda chapa resultando em rebarbas entre as chapas e na saída do segundo furo

Choi *et al* [9] investigaram a formação de rebarbas durante o processo de furação de materiais com múltiplas camadas. Este tipo de material é encontrado em várias partes de aeronaves onde se usam combinações de material como titânio/alumínio, alumínio/compósito, alumínio/titânio/aço ou simplesmente um “sanduíche” formado de alumínio/selante/alumínio.

Neste mesmo trabalho [9] observou-se a formação de rebarbas na saída do primeiro furo e entrada do segundo furo e, dependendo da plasticidade e da espessura da camada de selante, pode ocorrer de a primeira rebarba não tocar a segunda. Em outro caso podem ser geradas rebarbas que se tocam, sendo possível ainda que a primeira rebarba venha a suplantear a segunda. Caso a segunda rebarba seja mais resistente, devido à sua formação ou ao material de composição, a primeira rebarba poderá se enrolar para dentro ou para fora do furo, sendo a primeira situação a mais crítica.

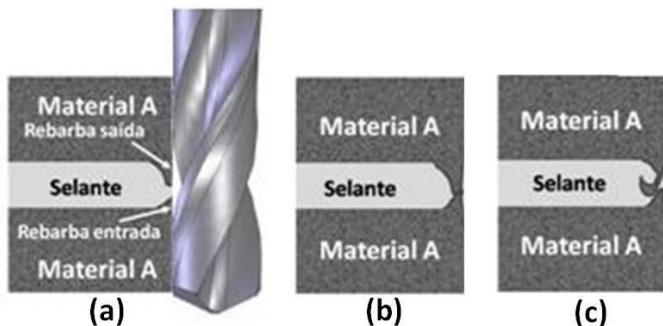


Figura 2. 12: Formação de rebarba em camadas sobrepostas [9]. (a) rebarba completamente desenvolvida, (b) rebarba da saída do primeiro furo toca a rebarba da entrada do segundo furo, (c) semelhante a (b) porém a rebarba da saída tem maior crescimento e se deforma ao tocar a rebarba da entrada,

Em outro estudo [9] afirmou-se que a diferença entre o material da primeira e da segunda camada também influenciará na formação de espaços entre as chapas, uma vez que seus módulos de elasticidade serão diferentes. Os autores do estudo observaram ainda que mesmo para materiais iguais a flexão irá variar. Isto ocorre uma vez que durante a furação a quantidade de material retirada no primeiro furo faz com que o comportamento elástico e plástico da primeira chapa seja diferente do da segunda, que inicialmente continua intacta.

Na fabricação de aeronaves, rebarbas decorrentes de processos de furação geradas entre as chapas causam erros de posicionamento entre as peças. A presença de rebarbas causa regiões com acúmulo de tensão que podem se transformar em pontos de início de trincas extremamente indesejáveis e preocupantes na fabricação de aeronaves. Tal fato é crítico para qualquer componente submetido a esforços dinâmicos cíclicos. Rebarbas e cavacos presentes entre as chapas podem propiciar corrosão entre as mesmas [5]. Etapas de rebarbação não agregam valor ao produto e sendo evitadas resultarão em aumento de eficiência e redução de custos no processo, o que vem sendo uma preocupação crescente na indústria aeronáutica [6].

O tipo de furação que vem sendo buscado em empresas aeronáuticas é aquele denominado de *onestep*. Neste uma broca ou um processo especial de usinagem é capaz de fazer furos sem a necessidade de utilizar alargadores ou de realizar etapas de limpeza e rebarbação. Todos os problemas causados pela flexão das chapas são ainda mais acentuados no caso de furos em revestimentos de aeronaves. Em tais casos os

dispositivos provisórios de fixação das partes são às vezes em quantidade insuficiente e proporcionam rigidez insuficiente ao conjunto. Somado a isso está o problema de se perfurar superfícies curvadas, que será abordado em tópicos a seguir.

b) Chapas curvadas

Conforme abordado anteriormente, as chapas (*skins*) de uma aeronave são calandradas para tomarem a forma da fuselagem, sendo que essa curvatura influencia diretamente nos processos subsequentes de furação e rebiteagem.

Na literatura não são encontrados muitos estudos sobre furação de chapas calandradas, onde as superfícies por onde a broca entra e por onde a mesma sai não são planas, mas curvadas. Além disso, o estudo de formação de rebarbas neste tipo de furação é pouco abordado na literatura. No entanto, um estudo requer particular atenção, [10] no qual a influência da curvatura da superfície da peça por onde a broca entra e por onde a mesma sai é avaliada em relação à formação de rebarbas.

Uma forma de se avaliar a curvatura de uma superfície durante um processo de furação se dá pelo ângulo entre a direção de avanço da broca e a tangente à superfície usinada. Um exemplo típico é o de usinagem de furos que se interceptam, muitas vezes feito para lubrificação de componentes rotativos [7]. A inclinação da superfície da peça possui uma grande influência sobre a interação entre o gume da ferramenta e a superfície propriamente dita. Considera-se que o gume principal de uma broca tenda a empurrar o material da peça (durante a saída da broca pelo furo) para fora, gerando rebarbas. No entanto, isso só é verdade se a direção de avanço da ferramenta for perpendicular à superfície por onde a broca sai da peça. Supondo que a superfície da peça por onde a broca sai seja inclinada, a formação de rebarbas se dá em parte do furo, sendo mínima ou nula nas outras partes. Isto difere do que ocorre em furos feitos em superfícies perpendiculares à direção de avanço da ferramenta, onde a rebarba tende a circundar todo o furo. Explica-se tal situação pelo fato do gume principal em determinados momentos entrar na superfície da peça, o que depende de fatores como ângulo da superfície da peça em relação à direção de avanço, velocidade de corte e avanço [10].

A formação da rebarba está relacionada diretamente ao fato do gume empurrar ou não o material da peça para fora (na saída da broca pelo furo). Em lugares onde o gume entra na peça surgem rebarbas pe-

quenas ou nulas e nas partes da saída do furo onde o gume sai da peça as rebarbas formadas são significativas [10].

Ao se usar uma superfície curvada como na Figura 2.13 a formação de rebarba se divide em quadrantes. Na furação de chapas do revestimento de aeronaves a superfície é curvada, fazendo com que a rebarba se assemelhe ao apresentado na Figura 2.13.

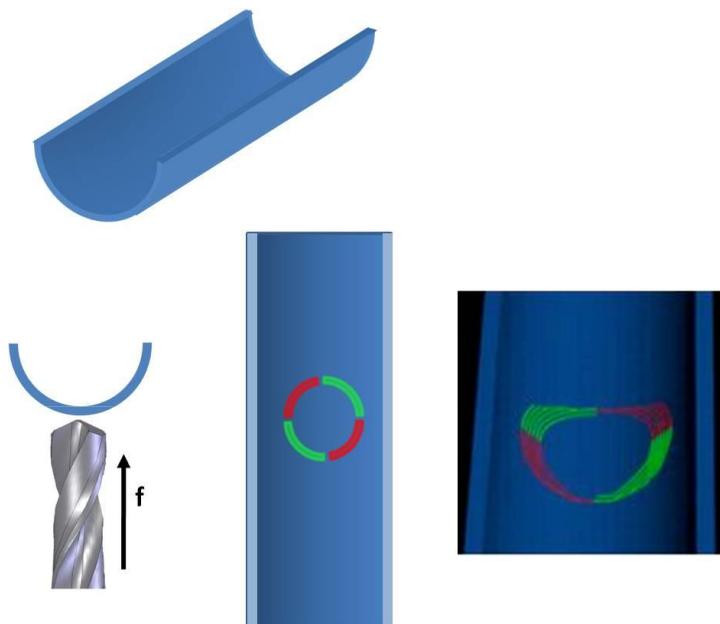


Figura 2. 13: Furação com saída da broca pela superfície curvada de uma peça

A superfície convexa por onde a broca sai apresenta áreas demarcadas de verde e de vermelho. As partes em verde são aquelas por onde o gume principal entra na peça ficando a saída do furo isenta de rebarbas. As regiões em vermelho apresentam rebarbas, pois o gume das ferramenta saiu da superfície da peça [10].

c) Fixação provisória das chapas

No posicionamento e fixação de chapas e partes de aeronaves como perfis, nervuras e reforçadores empregam-se constantemente dispositivos de fixação provisória (glecos). Estes têm o objetivo de manter as partes posicionadas enquanto são marcadas, furadas e posteriormente fixadas por prendedores definitivos (rebites cegos, *Lockbolt* e *Hi-loks*, por exemplo) [3].

Existe uma estratégia de utilização de prendedores provisórios (por exemplo, glecos) em revestimento de fuselagens. O objetivo final é furar as chapas para em seguida cravar os rebites ou prendedores definitivos que manterão as partes unidas. Todavia, para se furar as chapas deve-se posicioná-las corretamente e assim mantê-las ao longo do processo de furação [3]. Para isso são feitos furos estratégicos (Figuras 2.14 e 2.15) para que os prendedores provisórios sejam alocados [9]. Os furos de fixação são feitos com diâmetros provisórios como o de 2,5mm que posteriormente será alargado para inserção do rebite.

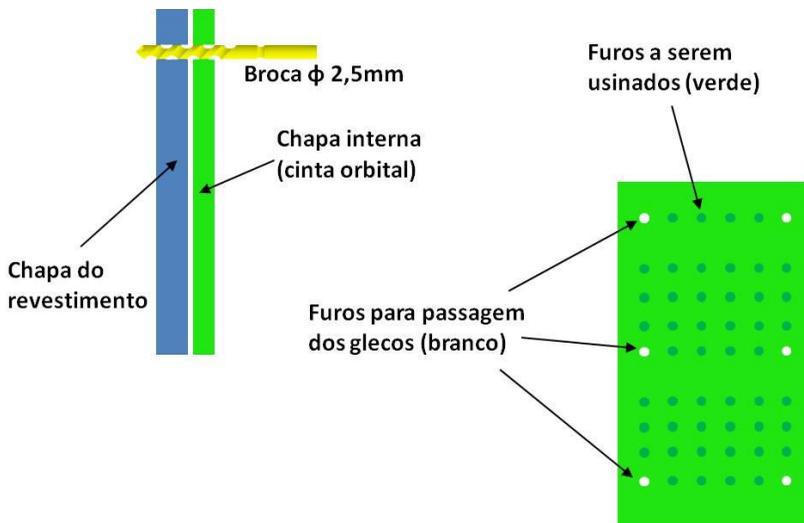


Figura 2. 14: Furação em posições estratégicas do pacote com brocas de 2,5mm para passagem do prendedor provisório (pontos em branco são aqueles onde os prendedores são colocados e os pontos escuros aqueles a serem furados em etapas subsequentes)

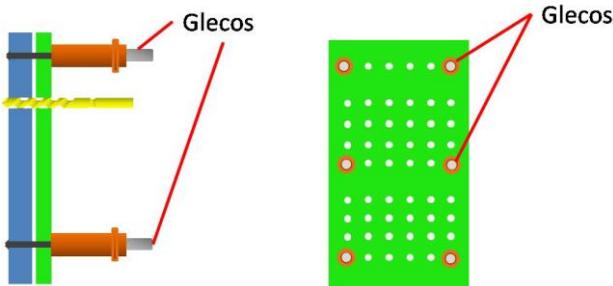


Figura 2. 15: Posicionamento dos prendedores provisórios e furação do pacote para alocação dos rebites

d) Aplicação de selante e rebitagem

Antes que as partes sejam rebitadas é preciso fazer uma limpeza entre as chapas para remover os cavacos e as rebarbas. Isto é feito não somente por estes atrapalharem no posicionamento das peças, mas também por ser necessária a aplicação de uma camada de selante [8, 9] na interface com o intuito de evitar problemas de corrosão (Figura 2.16). Para isso o conjunto é desmontado, limpo e de forma manual é aplicado o selante de interface que possui um tempo de cura específico.

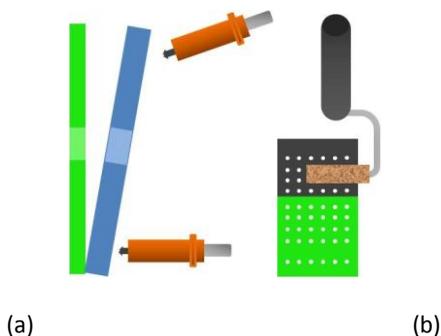


Figura 2. 16: (a) Desmontagem do conjunto para limpeza das rebarbas e cavacos e (b) aplicação do selante de interface para evitar corrosão entre as chapas

Após a aplicação do selante entre as chapas o conjunto é novamente montado e os rebites são cravados unindo as partes (Figura 2.17). Ao longo da operação os prendedores provisórios vão sendo removidos dando lugar a prendedores definitivos (rebites ou pinos).

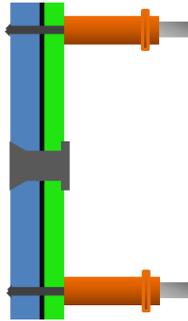


Figura 2. 17: Conjunto rebitado com o selante de interface entre as chapas

Como citado anteriormente, existem algumas etapas que não agregam valor ao produto, como por exemplo limpeza e rebarbação. Além disso, a parte de desmontagem e montagem de todo o conjunto torna essa fase morosa, elevando consideravelmente o tempo total de junção dos segmentos da fuselagem [8].

2.2 Rebarbas

2.2.1 Definição

Rebarbas são pequenas alterações relacionadas ao mecanismo de corte resultando em material fora da peça e causando variação geométrica e dimensional da mesma [11]. Alguns autores [12] definiram rebarbas como sendo material protuberante indesejável aderido à superfície da peça que se forma à frente do gume da ferramenta devido à deformação plástica que ocorre durante a usinagem.

2.2.2 Problemas com a presença de rebarbas

Os problemas envolvidos com a formação de rebarba e suas consequências indesejáveis foram levantados por diversos autores e analisados em vários processos de fabricação. Segundo Silva *et al* [11] rebarbas podem apresentar riscos para os operadores que manuseiam peças que as contém. Além disso, rebarbas que porventura se soltem da peça podem ocasionar o travamento de conjuntos montados. Para Chern [14] rebarbas são danosas mesmo durante a usinagem, pois se chocam contra o gume da ferramenta causando fissuras na mesma.

Chapas conformadas mecanicamente podem se rasgar devido à presença de rebarbas [15]. Chapas montadas sobrepostas, caso existam rebarbas nas superfícies entre elas, não possuem um bom posicionamento, o que pode gerar acúmulo de umidade entre estas e corrosões. Outro exemplo são as pequenas rebarbas deixadas em cilindros de motores automotivos após as operações de retificação, ocasionando falhas durante o funcionamento do motor. Rebarbas não identificadas em equipamentos de segurança podem também reduzir o desempenho dos mesmos. A qualidade das quinias e a presença de rebarbas estão muito relacionadas ao desempenho, segurança, preço e aparência de produtos.

Segundo Gillespie [15], a ocorrência dos fatos listados a seguir evidencia como a presença de rebarbas não é algo desprezível, e que merece um estudo cauteloso a fim de ser eliminada ou reduzida:

- Corte nas mãos durante etapas de montagem e desmontagem.
- Mau assentamento de interfaces em montagens.
- Travamento de mecanismos.
- Superfícies sobrepostas riscadas que permitirão vazamentos de líquidos.
- Atrito aumentado ou alterado que não é permitido em algumas montagens.
- Aumento de desgaste em peças móveis ou tensionadas.
- Curtos-circuitos elétricos.
- Fios cortados por arestas vivas ou rebarbas afiadas.
- Campos magnéticos e elétricos irregulares.
- Contaminação de metais em montagens aeroespaciais.
- Entupimento de filtros e partes por desprendimento de rebarbas.
- Corte de selos de borracha e *o-rings*.
- Concentração excessiva de tensão.
- Escoamento turbulento e não linear.
- Medições dimensionais incertas.

Silva *et al* [11] afirmam que a etapa de rebarbação, muitas vezes necessária após o processo de fabricação, normalmente não é feita de maneira automatizada porém manualmente, requerendo um gasto considerável com mão-de-obra, além de tempo consumido. Tarefas dessa natureza, assim como processos de inspeção, não agregam nenhum valor às peças produzidas. Além disso, tempo excessivo leva à geração de um gargalo no processo prejudicando assim toda a produção.

2.2.3 Mecanismos de Formação de Rebarbas

As rebarbas podem ser classificadas segundo os seus mecanismos de formação e segundo as suas diversas formas. De acordo com Silva *et al* [16] as rebarbas podem ser classificadas segundo três critérios: mecanismos de formação, gume responsável por sua geração [17] e segundo critérios de orientação e forma da rebarba [18]. Outros autores [13] identificaram três tipos de mecanismos de formação de rebarba. No primeiro o fluxo de retirada de material proporciona deformação lateral deste, no segundo ocorre a flexão do cavaco na direção de corte quando a ferramenta atinge o ponto de saída da peça e por último a ruptura por tração do material entre a peça e o cavaco.

O entendimento do processo de formação de rebarbas não é trivial, uma vez que envolve deformação plástica em várias direções [17, 19, 20, 21].

Chern [14] realizou um estudo sobre mecanismos de formação de rebarbas e quebra de quina durante a saída da ferramenta pela superfície de peças usinadas em cortes ortogonais.

Chern [14] avaliou o corte ortogonal de quatro materiais, quais sejam, cobre recozido, Al 1100, Al 2024 T4, A 6061 T6.

Ele observou que no momento em que a ferramenta se aproxima do seu ponto de saída pela peça (ponto D) surge um plano, o qual denominou plano (AB) ou negativo de deformação (Figura 2.18), cujo ângulo de referência é β_0 . O plano AB se forma ao longo da linha entre a ponta da ferramenta A e o ponto de pivotamento do material B. A partir do momento da formação deste plano, quanto mais a ferramenta avança, observa-se um trecho CE que permanece sem o corte da ferramenta.

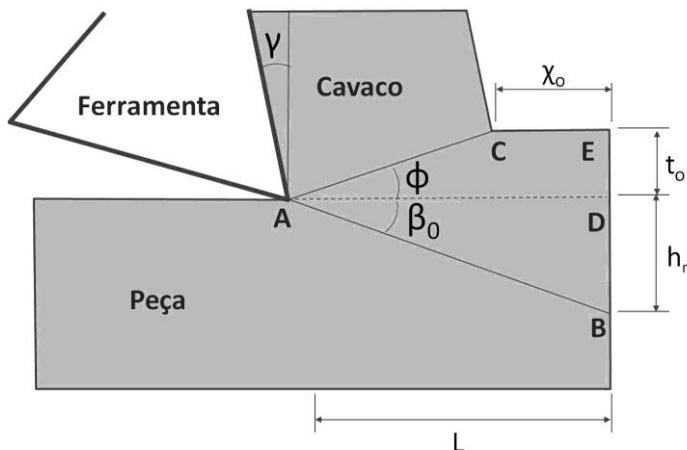


Figura 2.18: Aproximação da ferramenta ao ponto por onde esta sai pela peça com a formação do plano negativo de cisalhamento AB [14]

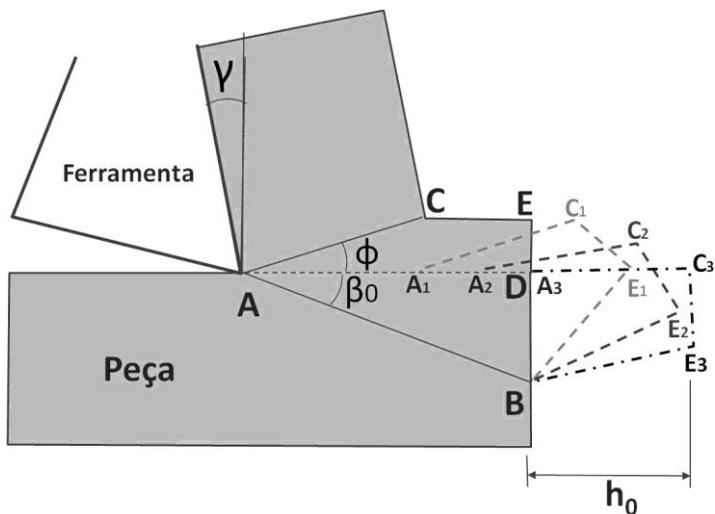


Figura 2.19: Avanço da ferramenta e formação da rebarba [14]

O ângulo β_0 apresenta um aumento gradativo desde o início da formação da rebarba (início do pivotamento do material em torno de B) até a saída da ferramenta pela peça (Figura 2.19). Pode-se observar melhor todo o processo na imagem produzida pelo MEV durante a usinagem (Figura 2.20), onde é nítido o início da ruptura no plano de cisa-

lhamento AC, a parte CE não cortada e a deformação do material formando a rebarba.

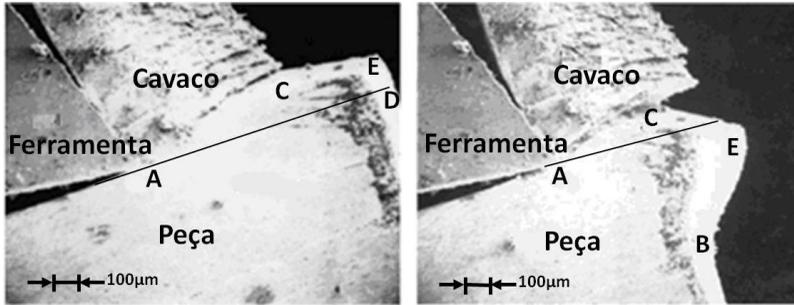


Figura 2. 20: Imagem obtida com microscópio de varredura representando a formação da rebarba em corte ortogonal quando a ferramenta esta prestes a sair da peça [14]

Chern [14] observou que para materiais mais dúcteis como o cobre o padrão de deformação e geração de rebarba era como o descrito anteriormente. No entanto ao se usinar o Al 2024 T4 e o Al 6061 T6, estes apresentaram quebra nas quinas (Figura 2.21).

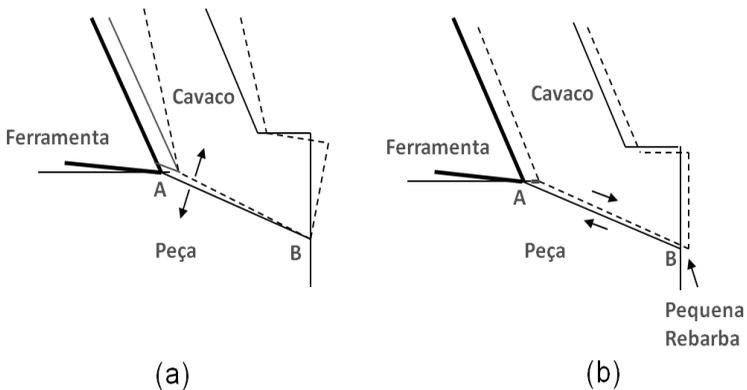


Figura 2. 21: (a) Formação da rebarba no Al 2024 T4 e (b) formação da rebarba no Al 6061 T6 [14]

Ao invés de simplesmente ocorrer uma deformação plástica do material originando a rebarba durante a saída da ferramenta, no alumínio Al 2024 T4 e no alumínio Al 6061 T6 ocorreu uma quebra ao longo do plano negativo de deformação AB (Figura 2.21).

No alumínio Al 2024 T4 a quebra ao longo do plano de cisalhamento se deu como visualizado na Figura 2.21 (a), onde um esforço de tração fez com que o cavaco se rompesse da peça. Já no alumínio Al 6061 T6 (Figura 2.21 b) ocorreu um esforço cisalhante no plano negativo de deformação ocasionando ao final uma pequena rebarba.

2.2.4 Formas de Rebarbas

São várias as formas de rebarbas encontradas em processos de fabricação, principalmente na usinagem, foco desta análise. Por ser de geometria complexa a caracterização da forma das rebarbas não é tarefa simples [14, 22]. Dependendo das especificações de projeto, um mínimo de rebarba formada na direção perpendicular à superfície da peça por onde a ferramenta sai (altura da rebarba) pode caracterizar a peça como não conforme. Em outras situações os fatores críticos podem ser a largura da rebarba ou o volume da mesma. Na tentativa de delimitar o problema e ainda englobar o maior número de informações, alguns pesquisadores vêm desenvolvendo métodos para descrever geometricamente a forma das rebarbas [23, 24] (Figura 2.22).

Para cada processo de fabricação, fresamento, torneamento, retificação, dentre outros, as formas típicas de rebarba variam bastante. Narigudde [25] divide as rebarbas da seguinte forma:

Tipo I: Uniforme com altura e largura consistentes e, segundo os autores, não requerem grandes esforços para serem removidas da peça (Figura 2.23).

Tipo II: Semelhante ao tipo I, no entanto é inclinada na direção da superfície por onde a ferramenta sai da peça.

Tipo III: Apresenta inclinação maior que no tipo II sendo porém com forma enrolada.

Tipo IV: Semelhante ao tipo III com enrolamento, porém sua altura é menor.

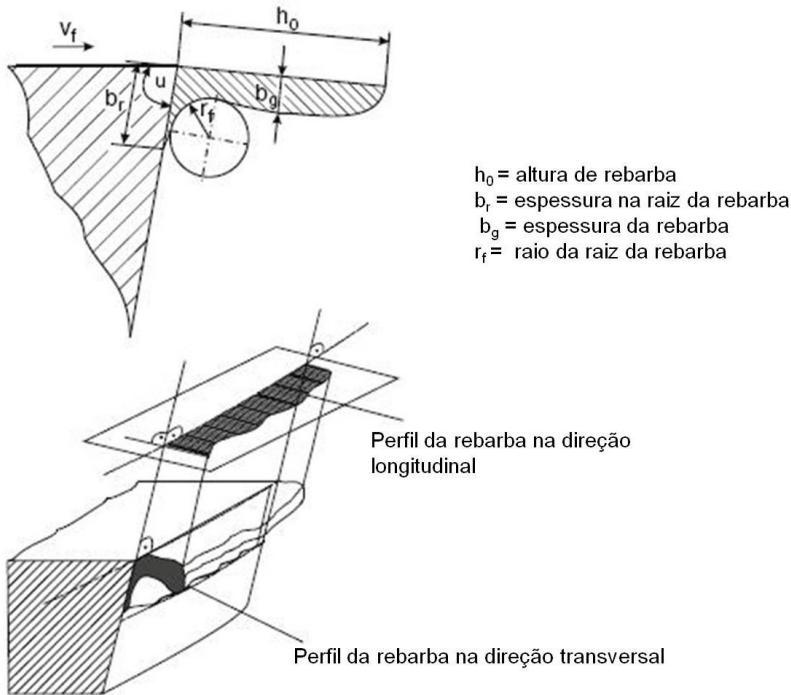


Figura 2. 22: Padrões utilizados para medição de rebarbas [24]

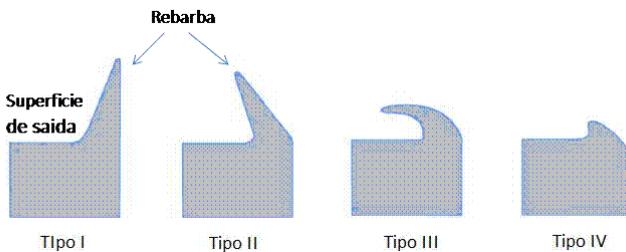


Figura 2. 23: Tipos de formação de rebarba

Segundo Gillespie e Blotter [13] as rebarbas podem ser classificadas em quatro tipos: Poisson, curvada, rasgada e cortada (Figura 2.24). O tipo Poisson ocorre por uma tendência de o material “embarriçar” nas laterais ao ser comprimido, no entanto, este nome Poisson é contestado uma vez que o efeito Poisson só ocorre no regime elástico e

neste caso a deformação é também plástica [26]. Rebarbas rasgadas são fruto de material cisalhado semelhante ao que ocorre em operações de puncionamento, sendo que surgem pelo seu desprendimento da peça bruta antes que o corte seja finalizado.

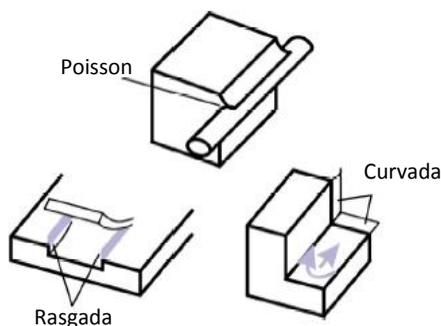


Figura 2. 24: Tipos de rebarba Poisson, Curvada e Rasgada [27]

2.2.5 Medição de Rebarbas

Tanto na indústria quanto na pesquisa são necessárias maneiras de quantificar as rebarbas de forma a se controlar melhor os fatores que têm influência direta na formação destas. Para fazer esta quantificação utilizam-se os parâmetros já explicados de altura, largura, volume e dureza, entre outros. A altura de rebarbas, segundo alguns autores, é a que menos apresenta dificuldades em processos de rebarbação e a mais fácil de ser mensurada. Já a espessura é mais difícil de medir e também a mais significativa [28]. Estas afirmações devem, todavia, ser avaliadas com cuidado para cada situação específica. Dos parâmetros o volume é o mais difícil de ser avaliado, uma vez que a seção transversal e altura apresentam uma variação ao longo da circunferência do furo. Para Kim [28] o volume é o fator que mais representaria o custo para rebarbação, uma vez que o custo aumenta na proporção do aumento do volume da rebarba.

São vários os métodos de medição empregados ultimamente, sendo necessária a avaliação de alguns fatores da rebarba para uma escolha mais assertiva como: rigidez do material da rebarba, se as rebarbas estão no campo de microusinagem, se o material a ser medido é opaco

ou reflexivo, se o material é condutor e os gastos necessários para adquirir equipamentos de medição. Segundo alguns autores [27] o “teste da unha”, onde o operador passa o dedo sobre superfícies usinadas em busca de rebarbas ainda é utilizado em 71% de uma série de empresas onde foram realizadas pesquisas.

Os métodos de medição de rebarbas podem ser divididos em três [27, 29, 30]:

- 1D, 2D e 3D, ou seja, uma, duas e três dimensões.
- Destrutivos e não destrutivos.
- Com ou sem contato.

a) Métodos destrutivos de medição

Estes métodos invalidam a peça ou a parte sendo analisada, não permitindo mais a sua utilização. Não obstante, Aurich *et al* [27] discordem que um bom método para uma minuciosa análise de rebarbas é a metalografia, que permite observar a dureza da seção e as alterações resultantes do processo de corte. Estes autores afirmaram também que em situações onde a rebarba é do tipo encurvada para trás ou espiralada o único método de quantificar o comprimento é o de análise metalográfica. Essa técnica no entanto exige o preparo das amostras (embutimento), que é trabalhoso e requer um tempo maior de preparo se comparado a outras técnicas apresentadas.

b) Sistemas mecânicos

Os sistemas mecânicos de medição são aqueles onde se necessita do contato direto de um sensor sobre a rebarba para medi-la. Mas na maioria das vezes, com esses métodos só é possível medir a altura da rebarba. Esse método de medição é trabalhoso, pois são necessárias várias varreduras para se obter um contorno aproximado de toda a rebarba. No entanto, é considerado um dos mais acurados servindo inclusive para verificar o desempenho de outros métodos como os de medição óptica por exemplo [27]. Os autores ressaltam que o limitante das técnicas de contato é a capacidade de resistir que as rebarbas têm. Caso a força de contato do sistema de medição seja excessiva as rebarbas podem ser destruídas ou empurradas invalidando a medição.

c) Sistemas ópticos

Uma das formas de se evitar o contato na medição de rebarbas é através de sistemas ópticos [8], dentre os quais destacam-se sistemas com câmeras, microscópios, LASER e interferômetros.

Para mensurar as rebarbas resultantes de um processo de furação com brocas helicoidais Gary e Simon [31] utilizaram um microscópio de medir perfil com o qual foi medida a altura da rebarba em quatro pontos diferentes, utilizando o maior valor como parâmetro.

Em outro estudo Ballou *et al* [32] fizeram a análise da altura e da largura da rebarba utilizando microscopia eletrônica de varredura. Para utilizar este procedimento as amostras foram seccionadas por eletroerosão a fio. Assim, obtida a secção em corte do furo mediu-se a largura da base da rebarba e a altura em relação à superfície por onde a broca saiu da peça empregando-se MEV.

Em outras pesquisas foram utilizados sistemas de medição a LASER [33] para determinar as dimensões da rebarba. Para verificar a altura de micro-rebarbas em operações de microusinagem, Ko e Kim [34] fizeram uma análise pelo método de triangulação e interferometria.

Nakao e Watanabe [35] desenvolveram um sistema de medição de altura e largura de rebarbas na furação utilizando técnicas de processamento de imagens. Neste método uma câmera, montada verticalmente à direção da rebarba, capta a superfície lateral da rebarba. A medição da rebarba se dá por um software que faz todo o processamento da imagem calculando as dimensões da rebarba pelo número de pixels negros contidos na imagem [36].

2.3 O Processo de Furação

A geração de furos cilíndricos durante a fabricação de um produto até este chegar à sua forma final remete aos primórdios da manufatura. Ao longo dos anos essa operação passou por um processo evolutivo e seletivo até chegar ao que hoje são as técnicas mais adotadas em usinagem de furos. Furos realizados por processos com retirada de material estão presentes em todos os três grandes grupos da usinagem [37]:

- Ferramentas com geometria definida: furação com brocas helicoidais, mandrilamento, fresamento, alargamento, brochamento.

- Ferramentas com geometria não-definida: furos que precisam de acabamento final para chegarem à sua medida final utilizando rebolos, processos de lapidação, brunimento.

- Processos não-convencionais: processos de remoção de material que muitas vezes não requerem o contato de uma ferramenta com a peça para gerar o furo. Atualmente pesquisas são realizadas na produção de furos utilizando feixes de LASER, jatos abrasivos (água sobre alta pressão com partículas sólidas), corte com plasma, eletroerosão e furação com brocas helicoidais assistidas por ultra-som, dentre outros [37].

2.3.1 Brocas helicoidais

A furação com brocas helicoidais remete a tempos antigos. Um exemplo passado onde se pode verificar a utilização de brocas helicoidais para a furação vem de cerca de 150 anos atrás na América do Norte, onde Steve Morse criou a sua primeira broca helicoidal. Nas palavras do próprio Morse percebem-se algumas características de sua nova invenção: “As brocas comuns raspam o metal a ser furado, enquanto a minha corta o metal, descarrega os cavacos e fura sem entupimento (Steve Morse)”. Nota-se que desde antigamente as mesmas dificuldades encontradas estão presentes ainda hoje no processo de produção de furos [38], o que mostra que a broca de Morse não resolveu completamente os problemas de entupimento e corte deficiente na furação. Com o passar do tempo, inúmeros outros problemas foram levantados e descobriu-se que vários fatores exercem influência no processo de furação com brocas [39].

Broca:

- Material: composição química e estrutura,
- Forma: diâmetro, comprimento, ângulo de hélice, superfície de saída, superfície de folga.

Peça:

- Furo cego ou passante, profundidade do furo, material da peça, rigidez, tratamentos.

Máquina-ferramenta:

- Fundação, rigidez: dos cabeçotes, das guias e da mesa. Potência, velocidades de rotação, avanço etc.

Processo:

- Utilização de fluido de corte: capacidade de lubrificação, de refrigeração, resistência à alta pressão, vazão, aplicação (externa ou através de canais internos da broca).

- Parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte.

Características geométricas das brocas

Algumas características são comuns à maioria das brocas e servem de base para a compreensão de modelos com geometrias mais peculiares. Basicamente o corpo das brocas helicoidais possui uma haste a ser fixada na máquina e canais sulcados que circundando seu núcleo formam uma geometria helicoidal para a retirada do cavaco. A ponta da broca é de extrema importância, com ângulos e dimensões específicas, onde se encontram as principais partes responsáveis pelo corte (Figura 2.25) [40]. É importante observar com mais detalhes a ponta da broca, onde as interações ferramenta/peça/cavaco vão influenciar diretamente fatores como qualidade do furo e forças de corte inerentes ao processo. Na vista detalhada da ponta da broca (Figura 2.26) pode-se observar que existem: gumes principais, gumes secundários, superfícies de saída (face), flanco, gume transversal, núcleo, guias, que serão avaliados por partes a seguir.

Núcleo

As brocas helicoidais possuem um núcleo que é o responsável por manter a rigidez da broca durante o processo de furação. Este núcleo aumenta a sua seção na medida em que se passa da ponta da broca para a região da haste (Figura 2.27). Esse aumento chega a ser 10% do tamanho do núcleo. Devido a esta forma do núcleo deve-se levar em conta que na medida em que reafiações são feitas o gume transversal tende a crescer. Isso pode ser observado na Figura 2.27, onde a broca foi seccionada nas seções (X-X) e (Y-Y).

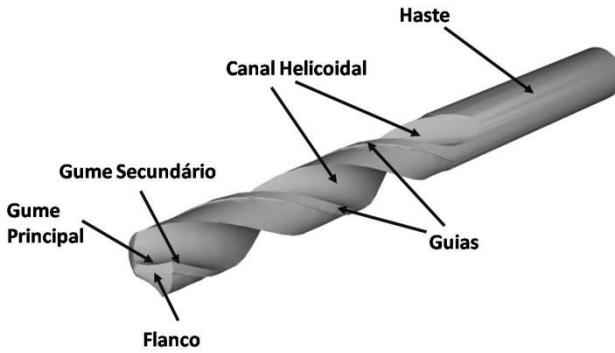


Figura 2. 25: Partes básicas de uma broca helicoidal

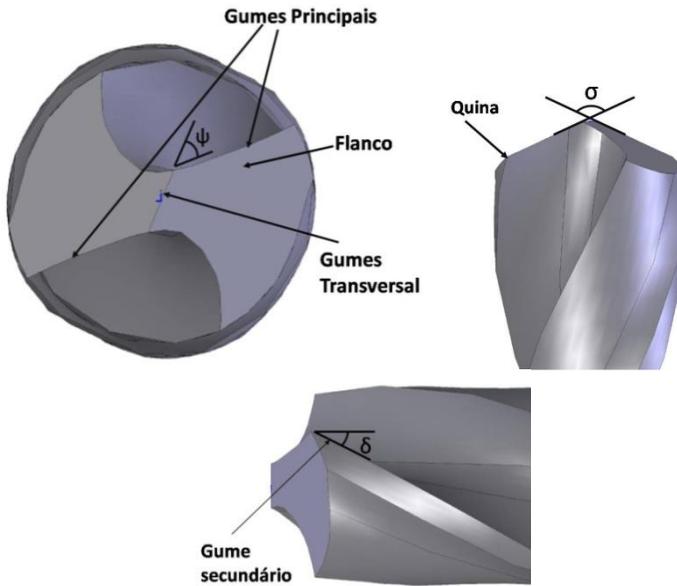


Figura 2. 26: Detalhes da ponta de uma broca helicoidal convencional

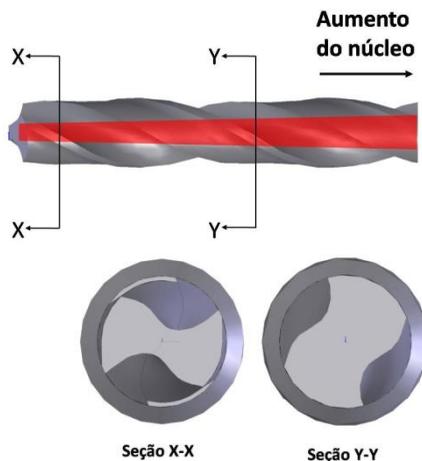


Figura 2. 27: Aumento do núcleo da broca ao longo do corpo desta com detalhe das seções transversais nos pontos X-X e Y-Y

Ângulo de ponta

O ângulo de ponta pode ser variado, causando uma elevação ou diminuição da espessura do cavaco aumentando ou diminuindo o comprimento da parte ativa dos gumes principais [41]. Alterações do ângulo de ponta influem diretamente sobre o ângulo de quina da ferramenta e podem fragilizar ou fortalecer esta região. As forças passivas e direções de saída do cavaco são também diretamente influenciadas pela angulação da ponta das brocas [42].

Tikal e Kammermeier *apud* Boeira [43] afirmam que um aumento do ângulo de ponta permite avanços maiores da ferramenta e uma melhor centragem da broca.

Gumes principais e secundários

O gume principal como em uma ferramenta de corte qualquer surge do encontro entre a face da ferramenta com o flanco primário. Como pode ser visto (Figura 2.26) são dois os gumes principais e estes se encontram deslocados em relação a uma linha radial que passa ao meio dos dois, desenhada no plano transversal da ferramenta. Esse des-

locamento visa gerar uma obliquidade na formação do cavaco que proporciona melhores condições de corte [42].

Os gumes principais podem apresentar três formas básicas (reta, côncava ou convexa) dependendo dos ângulos de ponta e de hélice empregados. Segundo Stemmer [42], para ângulos de hélice, de ponta e para formas de canais convencionais ($\sigma=118^\circ$ e $\delta=29^\circ$) um aumento do ângulo de ponta proporciona uma concavidade no gume gerando uma tendência deste enganchar e quebrar as quinas da ferramenta. Já para ângulos menores que 118° o gume se torna convexo, gerando vibrações durante a usinagem. O mesmo autor ressalta ainda a importância de gerar gumes simétricos entre si tanto em comprimento quanto em ângulo. Caso os comprimentos sejam assimétricos o furo gerado apresentará diâmetro maior que o da broca, correspondendo a duas vezes o raio maior da broca. Surgem ainda forças desbalanceadas que exercerão maior pressão sobre a parede do furo gerando maior força de atrito e desgaste desproporcional dos gumes.

O gume secundário é gerado pelo encontro de duas superfícies: o flanco secundário com a face da ferramenta. A face, neste caso, se estende ao longo de todo o canal helicoidal da ferramenta. Assim, o gume secundário igualmente se estende da ponta da ferramenta até o fim da hélice próximo à haste da ferramenta. Este gume é responsável pela qualidade da parede do furo gerada que também depende de outros fatores como será abordado.

Superfície de saída ou face e ângulo de hélice

A superfície de saída de uma broca (face) se encontra na ponta desta e se estende até o comprimento útil da broca. O ângulo γ dessa superfície é variável ao longo da direção do gume principal, variando de zero ou valores negativos no centro da broca até um valor equivalente ao do ângulo de hélice na quina da broca. Segundo Stemmer [42] este fator é uma deficiência da broca, pois gera condições diferentes de remoção de cavaco em cada parte do gume. Como já é sabido da literatura [11, 40], quanto mais positivo o ângulo de saída maior é o ângulo de cisalhamento, tornando assim menor o fator de recalque. Ou seja, é menor a deformação sofrida pelo material da peça ao se tornar cavaco, o que reduz as componentes de força de usinagem. Já ângulos mais negativos exercem o efeito contrário aumentando as forças de corte. Outra forma de reduzir o fator de recalque é através da redução do atrito na interface

cavaco/ferramenta o que às vezes é melhorado por meio de um polimento dos canais helicoidais da broca e por revestimentos especiais.

O ângulo de hélice e o de saída estão intrinsecamente relacionados. Além de determinarem as forças no processo de corte irão também reger a condução dos cavacos ao longo dos canais da broca. Estes servem para remover os cavacos produzidos na região de corte na proximidade da ponta da broca levando-os à superfície por onde a broca entrou [43]. Em vista disto, um fator predominante na escolha destes ângulos é o material a ser usinado. Diz-se basicamente que materiais frágeis devem ser usinados com ângulos de saída pequenos ou mesmo ligeiramente negativos, enquanto em materiais dúcteis ângulos maiores devem ser empregados [42].

A norma DIN 1414 divide as brocas quanto ao ângulo de hélice em três tipos:

Tipo N – indicadas para aços, alumínio de cavaco curto, níquel e ferro fundido maleável. Devem apresentar ângulos de hélice de 13° a 33° dependendo do diâmetro da broca.

Tipo H – recomendadas para materiais frágeis como ferro fundido, ligas de magnésio, fibra, baquelite, e outros. Devem possuir ângulos de hélice entre 8° e 16° conforme o diâmetro da broca.

Tipo W – sugeridas para materiais dúcteis como cobre, alumínio, ligas de zinco, plásticos e outros. Têm ângulos entre 32° e 45° de acordo com o diâmetro da broca.

Superfície de incidência ou flanco

Segundo Stemmer [42] e Castillo [41] a superfície de incidência também pode apresentar ângulo variável ao longo do gume principal, sendo interessante que este seja maior na quina da broca. Como nesta região o ângulo de saída é maior, evita-se uma fragilização da quina tornando o ângulo de cunha maior. Próximo ao centro da broca a sistemática é contrária, podendo-se utilizar ângulos de incidência maiores uma vez que o ângulo de cunha é maior devido ao menor ângulo de saída. Segundo a literatura [11] uma pequena angulação do flanco irá proporcionar uma quantidade maior de atrito entre a ferramenta e a peça, aumentando a temperatura da peça e gerando um mau acabamento do fundo do furo. Já para grandes ângulos de incidência o atrito pode ser reduzido, mas a resistência mecânica da cunha igualmente se reduz.

Gume transversal

Como observado anteriormente, as duas parcelas cortantes do gume principal encontram-se deslocados em relação a uma linha radial da ferramenta. Devido a este deslocamento surge um novo agente de corte, o gume transversal, que ao contrário das duas partes cortantes do gume principal, onde os ângulos de saída tendem a ser positivos, apresenta ângulos de saída extremamente negativos. Esta característica faz com que o corte nessa região central da broca seja deficiente, ocorrendo muitas vezes apenas um esmagamento do material ao invés do corte. Uma dificuldade devido à presença do gume transversal é a de que em afiações convencionais não se têm uma ponta definida, o que causa uma deficiência de direcionamento durante o início da furação, resultando em baixa acuracidade dos furos gerados. Com tudo isso se espera um aumento considerável das forças de usinagem.

Segundo Risse *apud* Boeira [43], para a componente de força F_f o gume transversal contribui com 65 a 75% da mesma. Já o gume principal contribuiu com cerca de 17 a 25% das forças de avanço. As outras partes da broca são responsáveis por cerca de 10% da força nesta direção. Para o momento torçor o gume transversal contribui com 10 a 14%, sendo 65 a 75% devido ao gume principal, sendo as demais partes da broca responsáveis por cerca de 15 a 20% do momento torçor.

Existe uma angulação do gume transversal denominada ψ (Figura 2.26) que está relacionada aos ângulos de incidência (α) selecionados, servindo inclusive como parâmetro de conferência para validar a correta retificação dos flancos [42, 44].

Com o objetivo de atenuar os efeitos negativos do gume transversal, algumas afiações diferentes vêm sendo testadas ao longo dos anos de forma a reduzi-lo, e reconfigurá-lo, aumentando sua capacidade de corte, e ainda gerando uma ponta que serve para direcionar a furação. Algumas afiações são apresentadas na Figuras 2.28 e são rapidamente explicadas.

Existem diferentes tipos de afiação de pontas de brocas se comparadas àquela inicialmente proposta por Morse. Algumas destas afiações têm o objetivo de diminuir o calor gerado, melhorar a capacidade de centragem e ainda reduzir as forças de avanço. Com a finalidade de reduzir as forças de avanço são utilizadas as afiações Tipo A e C que reduzem o tamanho do gume transversal.

Além dos problemas relacionados ao gume transversal existe o fato da velocidade de corte variar ao longo da linha do gume principal

diminuindo da quina da broca até zero no centro desta. Isto torna o corte ainda mais deficiente nessas regiões centrais.

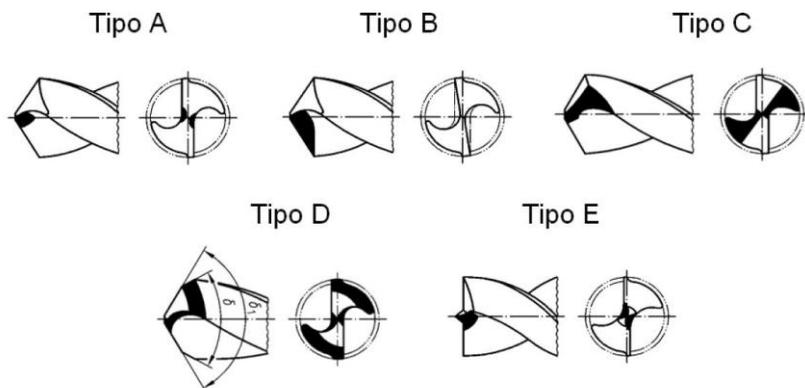


Figura 2. 28: Tipos especiais de afiação para redução do gume transversal DIN 1412 *apud* Boeira [43]

2.3.2 Formação de rebarba na furação com brocas helicoidais

Um dos grandes problemas em se efetuar furos, particularmente em materiais dúcteis, é a formação de rebarbas [45], que ocorrem tanto na entrada quanto na saída de um furo, sendo este último caso geralmente o mais crítico. A necessidade de rebarbação, por sua vez, traz maior dispêndio de tempo, ferramentas, máquinas e mão-de-obra, totalizando maiores despesas para a indústria. Os custos com operações de rebarbação podem chegar a 30% do valor de uma peça acabada [46].

São vários os fatores que influenciam na formação de rebarbas em processos de usinagem. Em um estudo sobre usinagem de furos que se interceptam [32] os autores investigaram a influência das condições de corte, propriedade dos materiais, curvatura da superfície da peça por

onde a broca sai, geometria e desgaste da ferramenta, dentre outros fatores de influência sobre a formação da rebarba [45].

a) Mecanismos de formação de rebarbas e formas de rebarba na furação

Segundo alguns trabalhos realizados [47], são três passos até a formação da rebarba durante um processo de furação utilizando brocas helicoidais:

1- Ao se aproximar do ponto de saída, ou seja, o momento em que a broca vaza o outro lado da peça, a quantidade de material a ser retirado no centro do furo é pequena, apresentando pouca rigidez. O gume transversal da broca, que apresenta ângulo de saída negativo, ao invés de remover material promove uma deformação plástica na região abaixo deste.

2- O material na região central do furo continua a se deformar, no entanto, a zona que se encontra mais próxima da quina da broca ainda apresenta uma quantidade de material para se manter com boa rigidez e se deformar pouco.

3- No passo subsequente duas são as possibilidades. O material abaixo do gume transversal se alonga o suficiente para ultrapassar o valor de tensão de escoamento e se rompe, seguido da saída completa da cunha da broca (forma-se a rebarba final tipo coroa) [47]. Ou à medida que a broca avança o material da peça se deforma e começa a romper na região próxima à quina da broca formando uma rebarba do tipo “chapéu” [33].

As rebarbas podem se apresentar de formas variadas dependendo do tipo de processo de fabricação utilizado (Figura 2.29). No processo de furação são três os tipos básicos de rebarba [33]:

- Tipo A: onde a rebarba formada é muito pequena ou até mesmo negativa devido à fragilidade inerente ao material usinado.

- Tipo B: onde ocorre uma maior quantidade de deformação plástica, se comparada ao caso anterior. A trinca que rompe a rebarba do material parcialmente ou totalmente se inicia na periferia do furo gerando ao final uma rebarba uniforme e também um “chapéu” que pode se destacar ou não da saída do furo.

- Tipo C: nesse caso o material apresenta uma considerável deformação plástica antes de se romper e a fratura se inicia na região próxima à ponta da ferramenta gerando uma forma bastante irregular.

Segundo Ko e Lee [48] essa ruptura ora na periferia, ora na parte central do furo está diretamente relacionada ao ângulo de ponta da ferramenta. Para ângulos menores as forças e conseqüentemente a deformação na parte central do furo são maiores, ocasionando a rebarba tipo coroa. Para ângulos maiores os esforços se concentram na periferia do furo, resultando em ruptura nesta região gerando rebarbas menores e mais uniformes. Segundo os pesquisadores, estas são mais fáceis de serem removidas se comparadas às rebarbas irregulares tipo coroa. Ko, Chang e Yang [33], bem como Ballou *et al* [32], encontraram resultados similares na usinagem de aço austemperado dúctil.

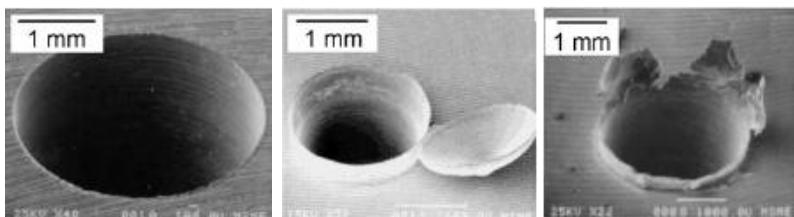


Figura 2. 29: Formação das rebarbas tipo uniforme, uniforme com “chapéu” e rebarba tipo coroa [27]

Em operações de furação em uma liga de Titânio Ti-6Al-4V [46] foi observado que para altos valores de velocidade de corte e de avanço a forma da rebarba formada foi tipo III (encurvada para trás). Neste mesmo trabalho [46] foram encontrados os quatro tipos de rebarba descritos [25], como pode ser visto na Figura 2.30.

Com relação à influência do desgaste da ferramenta sobre o tamanho da rebarba, foi considerado um desgaste de flanco de até 300 μ m em operações de furação utilizando brocas [32]. O tamanho das rebarbas podia ter um aumento de 100% em relação ao tamanho das rebarbas produzidas pela mesma broca, porém nova.

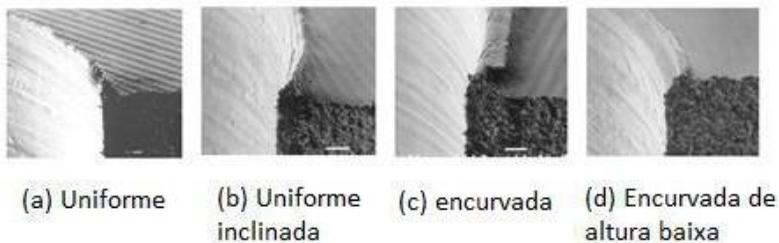


Figura 2. 30: Tipos de rebarba encontrados na furação de titânio Ti-6Al-4V [46]

Ballou *et al* [32] observaram que o aumento no ângulo de ponta gera ângulos de quina menores, o que fragiliza a ferramenta e gera um desgaste maior desta. Mais desgaste, conseqüentemente, proporciona a formação de rebarbas com maior espessura. Igualmente, um aumento do ângulo de hélice modifica o ângulo de saída da ferramenta que por sua vez reduz o ângulo de cunha da ferramenta. Essa redução no ângulo de cunha fragiliza a ferramenta ocasionando um desgaste, que como no caso anterior, aumenta a espessura da rebarba. Na Figura 2.31 pode-se observar um exemplo desta situação.

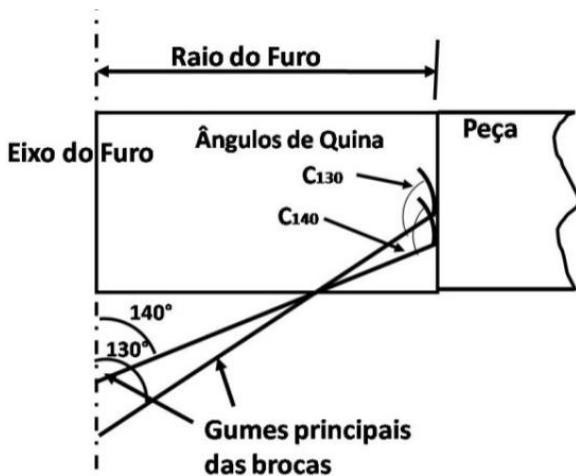


Figura 2. 31: Alteração do raio de quina da ferramenta para variação no ângulo de ponta [32]

2.3.3 Geometrias especiais de brocas para reduzir a formação de rebarbas

A seguir são apresentadas algumas geometrias especiais de brocas utilizadas atualmente com o intuito de reduzir a formação de rebarbas.

a) Brocas chanfradas

Como pode ser observada na Figura 2.32 a ponta da broca chanfrada apresenta uma parte central com ângulo de ponta σ_1 convencional sendo chanfrada formando uma segunda ponta com ângulo σ_2 na região próxima à quina da broca.

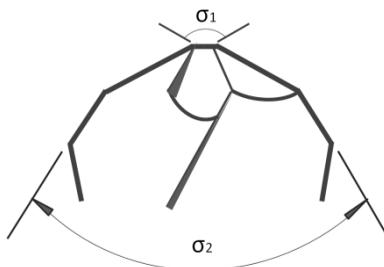


Figura 2. 32: Broca com ponta chanfrada

A geometria de ponta chanfrada tem como objetivo dividir o corte em duas partes diferentes. Como já visto anteriormente, maiores ângulos de ponta na região central da broca são interessantes, pois geram menores deformações no centro, reduzindo a propensão de formação da rebarba tipo coroa. No entanto, na quina da broca reduzindo o “ângulo de ponta” os efeitos são benéficos como será discutido a seguir.

Ko e Lee [48] ressaltaram que quanto maior a rigidez do material na saída do furo nas proximidades da borda do furo menor seria a tendência do material se deformar, flexionar e formar a rebarba. Assim duas brocas com diferentes ângulos foram testadas uma com chanfro de 40° e outra com 60° . A broca com chanfro de 40° apresentou os menores valores de altura de rebarba se comparada às de 60° . Pode ser visto pela

Figura 2.33 que na etapa de saída, a broca de 40° gera uma parte com maior rigidez (triângulo situado na saída da parede do furo) que apresenta uma tendência menor à flexão se comparada à broca de 60° . A conclusão do trabalho foi que para se reduzir a formação de rebarbas a parte da borda do furo na saída deve apresentar rigidez suficiente para ser cortada pela broca, ao invés de deformada e flexionada.

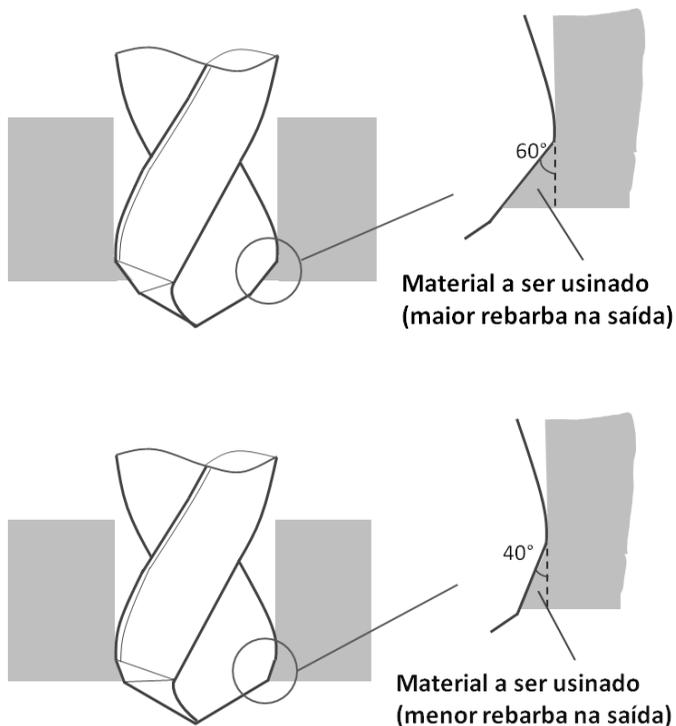


Figura 2. 33: Influência do ângulo de chanfro sobre a rigidez do material na saída da broca pelo furo

b) Brocas com quina arredondada

Seguindo o mesmo pensamento Ko e Lee [48] testaram uma quina arredondada (Figura 2.34) onde maiores raios geraram rebarbas maiores (Figura 2.35).

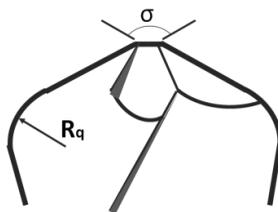


Figura 2. 34: Broca com quinas arredondadas

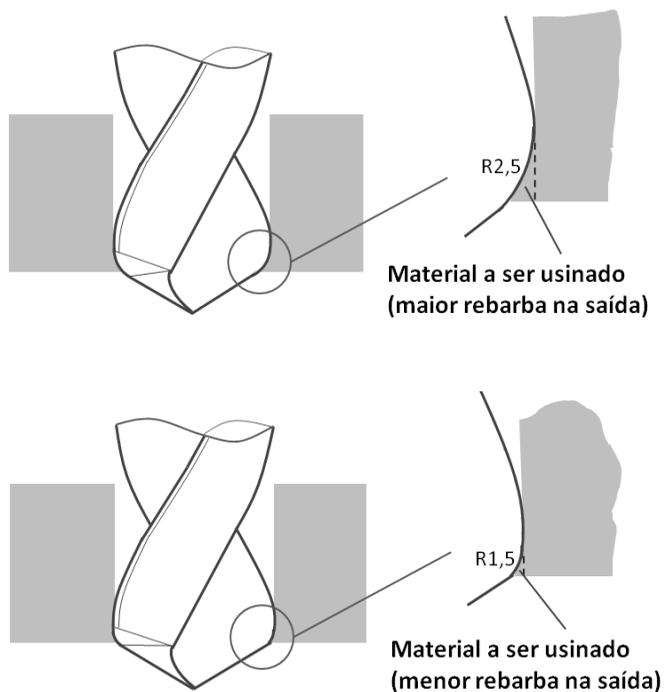


Figura 2. 35: Influência do raio da quina da broca sobre a rigidez do material durante a saída da broca

c) Brocas escalonadas

Apesar de normalmente serem empregadas quando se deseja obter um furo final com dois diâmetros diferentes, a broca escalonada vem

sendo utilizada como uma opção para reduzir a formação de rebarbas após o processo de furação. Numa broca escalonada [49] são basicamente quatro os parâmetros que podem ser variados: o ângulo de ponta da parte frontal (σ_1), o ângulo do escalonado (σ_2), a distância entre a quina da broca e o início do escalonado (d_e) e a diferença do diâmetro inicial para o diâmetro do escalonado ($D_2/2 - D_1/2$) (Figura 2.36).

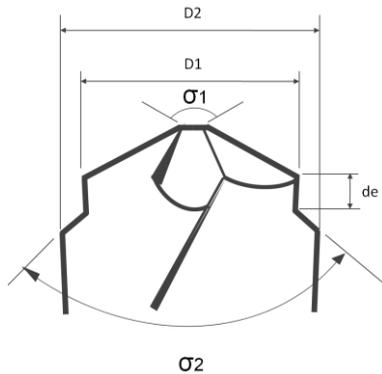


Figura 2. 36: Broca escalonada

O conceito por trás da utilização desse tipo de brocas é semelhante ao descrito anteriormente para brocas chanfradas e de quinas arredondadas, qual seja, separar em duas etapas o processo de furação. Desta forma tem-se um tipo de ângulo de posição do gume principal na parte central da ferramenta e uma posição diferente na quina da broca. No entanto, alguns autores [33] afirmam que as brocas escalonadas, comparadas às duas outras já discutidas, são as únicas capazes de separar o processo em duas etapas distintas. A primeira etapa da furação, realizada pela parte frontal da broca, é a responsável por fazer o que seria um pré-furo. Assim, a parte a ser usinada posteriormente não teria contato com o gume transversal da ferramenta. Isto reduziria consideravelmente as forças axiais, a deformação de material e a formação de rebarbas (Figura 2.37).

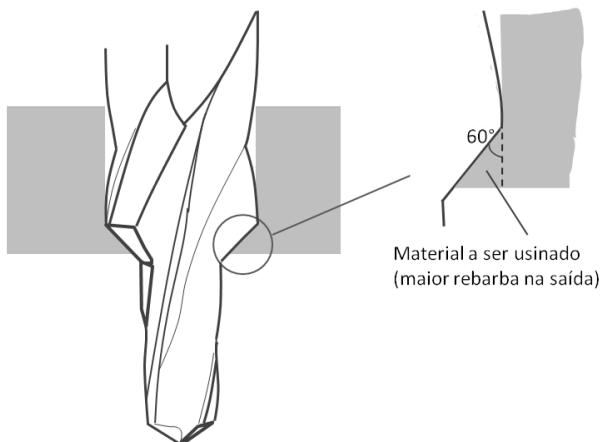


Figura 2. 37: Influência do ângulo do escalonado sobre a rigidez do material da peça na saída da broca

d) Brocas com ponta de centragem

Brocas com ponta de centragem vêm sendo empregado de maneira extensiva na usinagem de furos em materiais compostos. Recentemente, vêm sendo conduzidos alguns estudos para se utilizar esta broca em usinagem de alumínio com o intuito de reduzir a formação de rebarbas na saída dos furos. Albuquerque, Tavares e Durão [50] utilizaram na usinagem de materiais compostos quatro tipos diferentes de brocas: convencional, broca com ponta de centragem (denominada broca prego), broca escalonada e broca tipo punhal. No estudo, a broca que apresentou os melhores resultados com relação às forças de corte e delaminação foi a broca do tipo prego. Segundo os autores esta broca foi originalmente desenvolvida para a furação de madeira. Com a geometria pontiaguda do gume as fibras são tensionadas de tal maneira a gerar um corte limpo e uma superfície usinada suave [51, 52, 53, 54].

Um exemplo de uma broca de centragem pode ser observado na Figura 2.38, onde se percebe uma geometria bem diferente das brocas convencionais.

Uma broca com ponta de centragem (ou broca rabo de peixe, como também é denominada) apresenta um ângulo de ponta invertido e uma ponta central. Com isso, a característica de corte é bem diferente da produzida por brocas com quinas convencionais e gumes transversais.

O princípio dessa broca é o de forçar a ruptura inicial do furo na região da periferia deste durante a etapa de saída da broca. Como observado anteriormente este tipo de ruptura é desejável, uma vez que produz rebarbas mais uniformes, menores e facilmente removíveis. Ao contrário do que ocorre nas brocas convencionais, não existe uma sobra de material a ser removido próximo à parede do furo (Figura 2.39). Nesta situação não existe a mesma preocupação que no caso de brocas convencionais. Nestas últimas é interessante que permaneça uma sobra de material com rigidez suficiente na região próxima à quina da broca de tal forma que a sobra venha a ser cortada e não flexionada, gerando rebarba. Acredita-se que a broca tipo rabo de peixe possibilite um corte efetivo nessa região ao invés de flexão e formação de rebarbas.

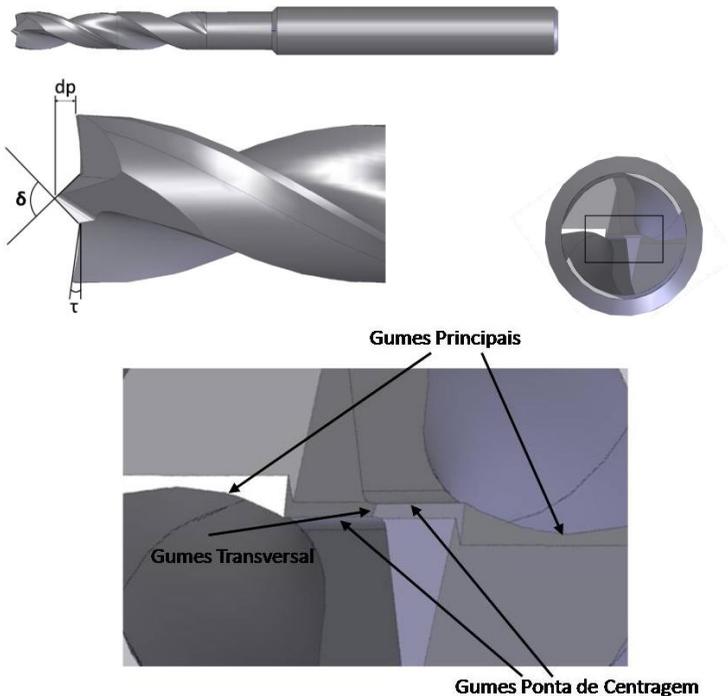


Figura 2. 38: Detalhes de uma broca de centragem

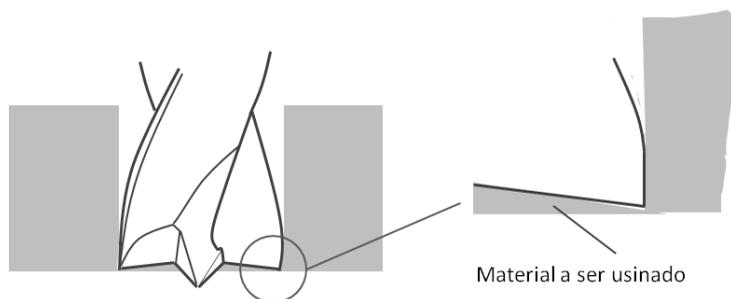


Figura 2. 39: Saída da broca tipo de centragem com detalhe do material a ser usinado

Stemmer [42] afirma que as brocas com ponta de centragem são adequadas para furação de chapas, apresentando ângulo de ponta entre 150° e 180° . Segundo o autor este tipo de broca apresenta a vantagem de evitar o “enganchamento” na chapa no momento da perfuração. Outras qualidades estão ligadas à pouca geração de rebarba e melhor localização do furo no centro da broca. Stemmer afirma ainda que este tipo de broca deve ser empregado para furos com profundidade menor que duas vezes o diâmetro.

O ângulo entre os gumes principais no caso destas brocas é invertido se comparado às brocas convencionais e em alguns casos pode ser medido conforme a Figura 2.38, onde se tem o ângulo denominado pela letra τ .

Como pode ser observado na Figura 2.40, quanto mais o ângulo de direção do gume se aproximar de 90° , maior será a componente de força na direção de avanço. Tal fato acarreta maior deformação de material neste sentido, o que contribui diretamente para a formação de rebarbas. No entanto, quando este ângulo diminui tendendo a zero a componente de força na direção de avanço reduz elevando a força na direção passiva [41]. Em processos de furação é interessante que a força se concentre na direção radial, ou seja, maior força passiva e não na direção de avanço. Para que isto ocorra no caso de brocas com pontas de centragem devem ser utilizados ângulos de ponta maiores como indicados na Figura 2.41.

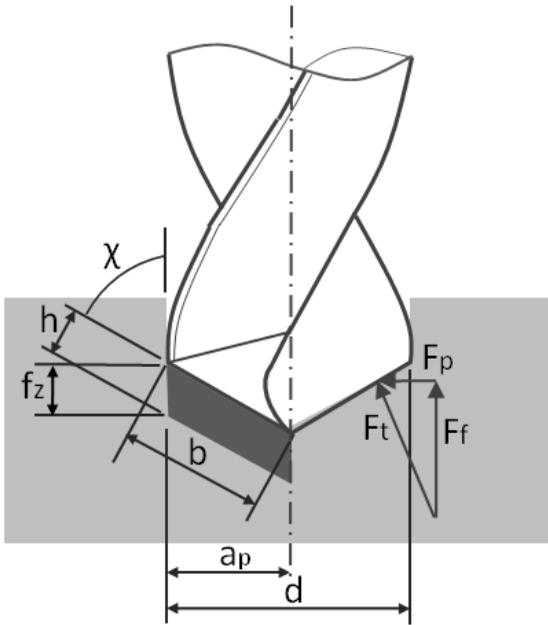


Figura 2. 40: Ângulo de direção do gume e forças de usinagem [43]

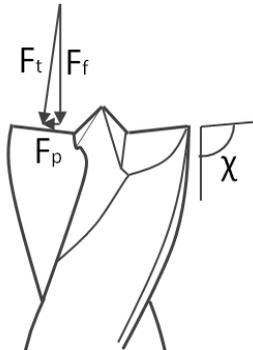


Figura 2. 41: Influência do ângulo de direção do gume principal em brocas com ponta de centragem sobre as forças na furagem

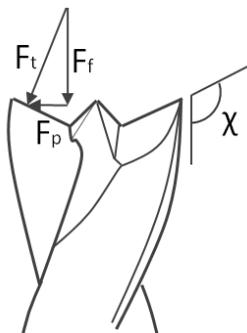


Figura 2. 42: Influência do ângulo de direção do gume principal em brocas com ponta de centragem sobre as forças na furação

A distância entre a ponta de centragem e a quina da broca pode apresentar basicamente três configurações, acima da linha das quinas da broca, ao mesmo nível ou abaixo da linha das quinas das brocas. Na situação onde as quinas estão em um nível inferior à ponta de centragem, espera-se um furo com centragem melhor, uma vez que a ponta de centro estará sempre avançada ao longo da usinagem. No entanto esta situação pode propiciar um início de ruptura no centro do furo, o que é desvantajoso. Na situação oposta, na qual as quinas estão avançadas em relação à ponta de centragem, espera-se que a ruptura durante a saída da ferramenta se inicie inevitavelmente na periferia e não no centro do furo, o que acarretaria em menor formação de rebarbas. No entanto, a eficiência da ponta de centragem ao longo do furo seria questionável, propiciando um furo desalinhado ou com erro de circularidade elevado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais, ferramentas e máquinas

Neste capítulo são apresentados os equipamentos, corpos de prova, dispositivos, ferramentas e técnicas utilizadas para a avaliação do desempenho das brocas no que diz respeito à qualidade do furo gerado.

3.1.1 Corpos de prova

Para representar de maneira acurada o processo de furação empregado atualmente pela empresa parceira, foram utilizadas chapas planas de alumínio ALCLAD 2024. Estas foram fornecidas com o revestimento de uma camada de resina Epóxi, denominada *primer*, que é bastante utilizada na aviação para evitar corrosão. Durante os ensaios, estas chapas foram sobrepostas duas a duas (sem a presença do selante entre elas) representando o sanduíche cinta/revestimento que normalmente é furado durante a emenda de segmentos de fuselagem.

Tabela 3. 1: Composição da liga 2024

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
2024	0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	0.1	0.15	restante

Os corpos de prova foram cortados nas dimensões de 100x50mm conforme observado na Figura 3.1.

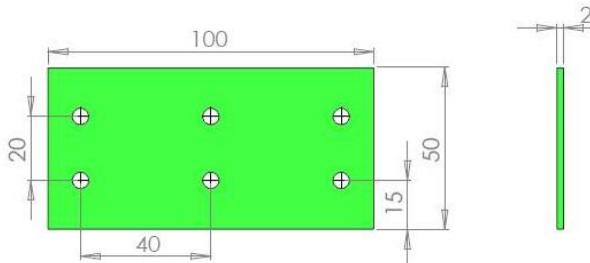


Figura 3. 1: Corpo de prova com os furos para fixação

Os seis furos presentes nos corpos de prova foram feitos para fixação destes ao dispositivo de fixação apresentado a seguir.

3.1.2 Dispositivos de fixação

O dispositivo de fixação das chapas utilizado durante os ensaios de furação foi usinado a partir de um bloco de alumínio aeronáutico e pode ser observado na Figura 3.2.

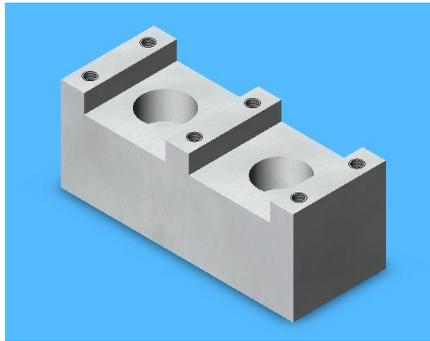


Figura 3. 2: Dispositivo para a fixação dos corpos de prova

O dispositivo apresenta dois furos maiores através dos quais dois parafusos M12 o prendem à plataforma de medição de forças. Este possuía ainda seis furos menores com rosca M5 utilizados para a fixação dos corpos de prova. Os dois rebaixos presentes na face superior do dispositivo foram usinados para permitir a saída completa das brocas pela superfície inferior das chapas.

Os corpos de prova foram montados sobre o dispositivo de fixação gerando um “pacote” de duas chapas que permitiu avaliar a influência das duas chapas sobrepostas sobre a furação. A distância entre os pontos de fixação (parafusos M5) não apresentava relação com as distâncias entre os rebites nem com a distância entre os *stringers* encontrada no processo real. Corpos de prova e dispositivos de fixação que representassem exatamente o processo de fabricação de um painel de fuselagem seriam demasiadamente grandes e desnecessários ao propósito deste trabalho. Inicialmente limitou-se à análise sobre a influência da

geometria da broca, o que permitia utilizar pequenos corpos de prova que poderiam ser usinados em centros de usinagem (Figura 3.3 e 3.4).

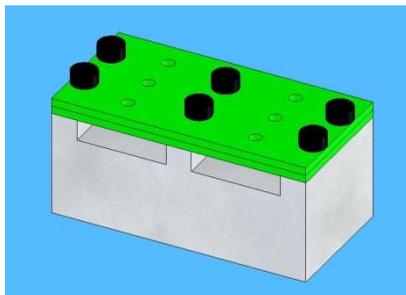


Figura 3. 3: Montagem dos corpos de prova sobre dispositivo de fixação

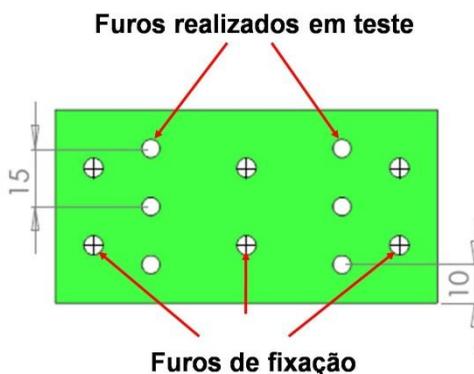


Figura 3. 4: Furação para pontos de fixação e furos realizados em teste

3.1.3 Ferramentas de corte

Neste estudo do desempenho das brocas helicoidais, no qual se avaliou a altura das rebarbas geradas, a circularidade dos furos, a deformação das chapas e as forças de usinagem, sete brocas foram empregadas. Uma das brocas seleccionadas é convencionalmente utilizada na furação de chapas finas na indústria aeronáutica, sendo que as demais foram desenvolvidas especialmente durante o estudo deste trabalho.

A concepção destas geometrias especiais visava gerar o mínimo possível de rebarbas na saída do furo e ainda atender às qualidades de circularidade dos furos e de flexão das chapas exigidas pela empresa em questão.

a) Broca convencional

A broca convencional (EMB) empregada foi de metal-duro revestida por DLC (*Diamond-Like Carbon*). Seu diâmetro era de 4,7mm com um ângulo de ponta de 128 graus e ângulo de hélice de 30 graus. Com afiação tipo A (Figura 2.28), esta broca pode ser visualizada na Figura 3.5.

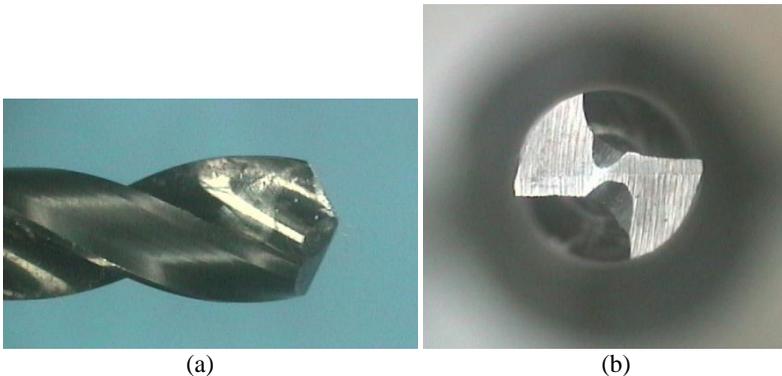


Figura 3. 5: Vista (a) lateral e (b) frontal da Broca EMB

b) Brocas especiais

As brocas projetadas contaram com o apoio do fabricante de ferramentas Iscar do Brasil, que se dispôs a produzi-las em conformidade com o projeto realizado pelo autor deste trabalho.

As seis brocas foram do tipo ponta de centragem produzidas em metal-duro classe IC08 (WC=90% e Co=10%). Optou-se por não utilizar o revestimento, uma vez que seu emprego se torna interessante para altas velocidades de corte e estas não podiam ser atingidas com a máquina utilizada nos ensaios. Com diâmetro de 4,7mm as brocas apresen-

tavam variações entre si no que diz respeito à distância da ponta da ferramenta à quina da mesma (Figura 3.6 a) e com relação ao ângulo de hélice (Figura 3.6 b).

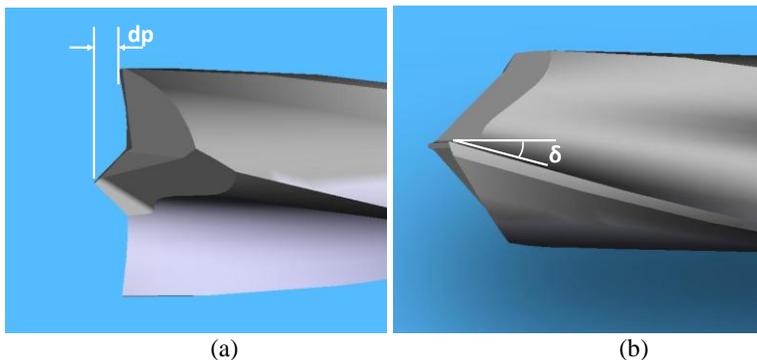


Figura 3. 6: (a) Distância longitudinal (d_p) entre a ponta da broca e a quina e (b) ângulo de hélice

Para manter o sigilo exigido pelas empresas envolvidas, somente algumas características da geometria da ferramenta são citadas (Tabela 3.2). Assim sendo, o ângulo de hélice variou em três níveis 15° , 30° e 45° . A distância da ponta da ferramenta à quina desta foi variada em dois níveis: d_p nula onde a ponta da ferramenta era rente à quina, e d_p positiva ($d_p=0,55\text{mm}$), onde a ponta era avançada em relação à quina. Na Tabela 3.2 pode ser visualizado o arranjo feito.

Tabela 3. 2: Variações das geometrias das brocas

Broca	Ângulo de hélice δ	Distância d_p
1	15°	+
2	15°	0
3	30°	+
4	30°	0
5	45°	+
6	45°	0

3.1.4 Máquina - ferramenta

Para evitar influências de operações manuais ou do robô que será utilizado futuramente nas operações de furação, utilizou-se um centro de usinagem para realizar a furação dos corpos de prova. Desta forma imputam-se as variações dos resultados analisados às brocas. A máquina utilizada para os ensaios foi um centro de usinagem vertical ROMI (Figura 3.7), que se encontra no Centro de Competência em Manufatura do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (CCM-ITA). Suas principais características são detalhadas na Tabela 3.3.

Tabela 3. 3: Especificações técnicas da máquina ferramenta

Fabricante	ROMI
Modelo	D800 AP
Comando	Siemens D828
Potência Máxima	15kW
Rotação Máxima	12000 rpm
Curso Máximo X	800mm
Curso Máximo Y	530mm
Curso Máximo Z	580mm



Figura 3.7: Centro de usinagem vertical Romi D800

O meio lubri-refrigerante utilizado foi o fluido semi-sintético Castrol SuperEdge 6552 (para maiores informações vide ANEXO I). O

meio lubri-refrigerante foi injetado no eixo-árvore com pressão de 15 bar e por mangueiras flexíveis com 2 bar a uma vazão de 20L/min (para maiores informações sobre a máquina-ferramenta vide ANEXO II).

3.2 Sistemas de Medição

Foram utilizados três sistemas de medições para analisar as seguintes variáveis: forças de usinagem, altura de rebarbas, circularidade dos furos e flexão das chapas.

3.2.1 Sistema de aquisição de forças

Para avaliar as características do torque e da força ao longo da usinagem das chapas foi utilizada uma plataforma piezelétrica do fabricante suíço Kistler. Esta atua pelo princípio da geração de tensões em cristais piezelétricos ao serem estes deformados (para verificar as especificações de calibração, faixas de operação e outros detalhes deste equipamento vide ANEXO III).

a) Sensor de medição com placa de proteção para fresamento

O sensor de forças e momentos modelo 9265B consiste na realidade de um conjunto de quatro sensores dispostos dentro de uma base que os aloja conferindo uma classe de proteção IP67 (classe de isolamento elétrico segundo a norma IEC-61140) ao sensor. Sobre este sensor foi colocada uma placa de proteção utilizada em ensaios de fresamento ou retificação, modelo 9443B, que protege o sensor de possíveis danos durante a usinagem (Figura 3.8). Sobre esta placa foi montado o dispositivo de fixação com o corpo de prova sobreposto (para maiores informações vide ANEXO III modelo 9443B).



Figura 3. 8: Sensor com a placa de proteção para ensaios de fresamento

b) Amplificador de sinais e cabo de sinais

Para transformar o sinal proveniente do sensor foi utilizado um amplificador da Kistler modelo 5070 A (Figura 3.9) que permite a visualização das forças bem como o controle dos canais e filtros durante a usinagem. A conexão entre o sensor e o amplificador foi feita por meio do cabo de sinais modelo 1500-15B com classe de proteção IP 67.



Figura 3. 9: Amplificador de sinais Kistler 5070 A

c) Placa de aquisição de dados

Para a aquisição e tratamento dos dados foi utilizada uma placa de aquisição modelo PCIM-DAS 1602/16, onde entram os sinais provenientes do amplificador. A placa devidamente instalada ao computador permite a visualização e o tratamento dos dados através do programa da Kistler Dynoware 2825A. Este último permite controlar diretamente o

amplificador, selecionando-se os tempos de aquisição, filtros passa-baixa, amplitudes de medição e outros parâmetros necessários.

O conjunto completo de medição de forças com o dispositivo de fixação e os corpos de prova fixados pode ser visualizado na Figura 3.10.

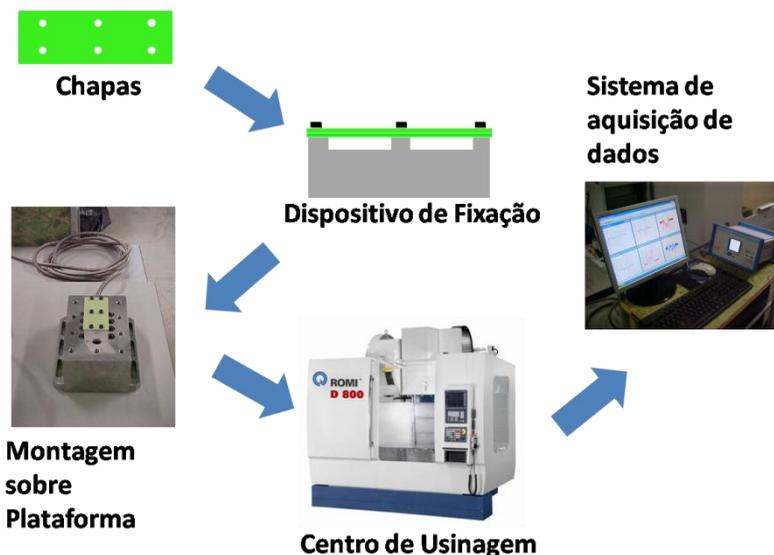


Figura 3. 10: Esquema da montagem para realização dos testes

3.2.2 Medição de altura de rebarbas

Apesar de existirem algumas restrições à medição de rebarbas pela técnica de contato, esta foi a utilizada neste trabalho. A razão desta escolha se deu por ser este o método disponível e viável, visto que outras técnicas estavam limitadas a tempos curtos de utilização, inviabilizando assim seu emprego. Em outros casos a preparação tornava-se excessivamente dispendiosa. Assim o instrumento utilizado foi um apalpador eletrônico, que apresentou menores forças, de modo a evitar assim a deformação das rebarbas. A metodologia destas medições será apresentada na seção 3.3.4.

Neste módulo de medição de altura de rebarbas na entrada e na saída dos furos, foram utilizados os seguintes componentes:

Apalpador eletrônico e amplificador de sinais

Fabricante Mahr

Resoluções: $(-0,200/+0,200/0,0001)$

Incerteza: $\pm 0,0005$

Fator de abrangência $K=2,2$ (intervalo de confiança de 95%)

Temperatura de calibração $(20\pm 1)^\circ\text{C}$

Suporte para apalpador

Fabricante: Starret

Desempeno de granito

Fabricante: Starret

Área: 1220×1830

Planeza: $(10,4 \pm 2,5) \mu\text{m}$

Fator de abrangência $K= 2$ (95%)

As medições de altura de rebarba foram realizadas no laboratório do Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI). A montagem do sistema de medição pode ser verificada na Figura 3.11, onde o apalpador eletrônico foi fixado ao suporte e este, por sua vez, apoiado sobre o desempenho, permitindo a movimentação daquele em um plano fixo. Um amplificador de sinais com indicador de leitura, ligado ao apalpador possibilitava a medição e coleta do valor de altura de rebarba.



Figura 3. 11: Montagem do sistema de medição para avaliação da altura de rebarbas

3.2.3 Medição da flexão

Para medir a flexão das chapas em pontos específicos (seção 3.3.3) foi utilizada uma máquina de medir por coordenadas da empresa Mitutoyo, modelo Crysta C 7106 que se encontra no laboratório CCM-ITA. Suas especificações são basicamente:

Curso de medição: X=700mm, Y=1000mm, Z=600mm

Resolução: 0,5 μ m

Tolerância: $\pm(1,7+3*L / 1000)$ mm

Para fixar os corpos de prova na mesa da máquina de medir foi utilizado o suporte da Figura 3.2. A máquina utilizada pode ser visualizada na Figura 3.12.



Figura 3. 12: Máquina de medir por coordenadas Mitutoyo Crysta C 7106

Foi utilizada uma ponta de rubi (diâmetro de 3mm e comprimento da haste de 50mm).

A máquina foi ligada a um computador no qual o software Mcosmos da Mitutoyo permite que os dados (seção 3.3.3) possam ser tratados e armazenados.

3.3 Ensaios de usinagem e medições

3.3.1 Planejamento de experimentos

Uma vez selecionadas as brocas, com as variações indicadas anteriormente, seguiu-se a seleção dos parâmetros de corte para a realização dos ensaios.

Com base nas recomendações dos fabricantes os ensaios foram executados com os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3. 4: Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante

v_c [m/min]	125	150	175
f [mm]	0,03	0,07	0,1

Foi realizado um arranjo fatorial completo visando testar todas as brocas variando-se com cada broca todos os parâmetros de corte selecionados. A Tabela do APÊNDICE III mostra o arranjo fatorial completo na qual é apresentada a sequência aleatória de realização dos testes que visa distribuir uniformemente as perturbações externas.

Para se estimar a repetitividade, cada experimento foi realizado com três amostragens, ou seja, duas repetições. Desta forma cada linha da Tabela do APÊNDICE III foi realizada três vezes.

As chapas foram montadas sobrepostas (Figura 3.13) e em cada montagem foram realizadas duas fileiras de furos. Em cada fileira, um parâmetro era variado, a velocidade de corte, o avanço, o ângulo de hélice da broca ou a distância d_p . No conjunto das chapas montadas as regiões de interesse a serem avaliadas eram: a entrada e a saída do primeiro furo e a entrada e a saída do segundo furo.

3.3.2 Setup do sistema de aquisição de forças e momentos

No sistema de aquisição de forças foi utilizada uma taxa de aquisição de 200Hz considerada suficiente para uma varredura inicial do comportamento das forças na direção de avanço da ferramenta.

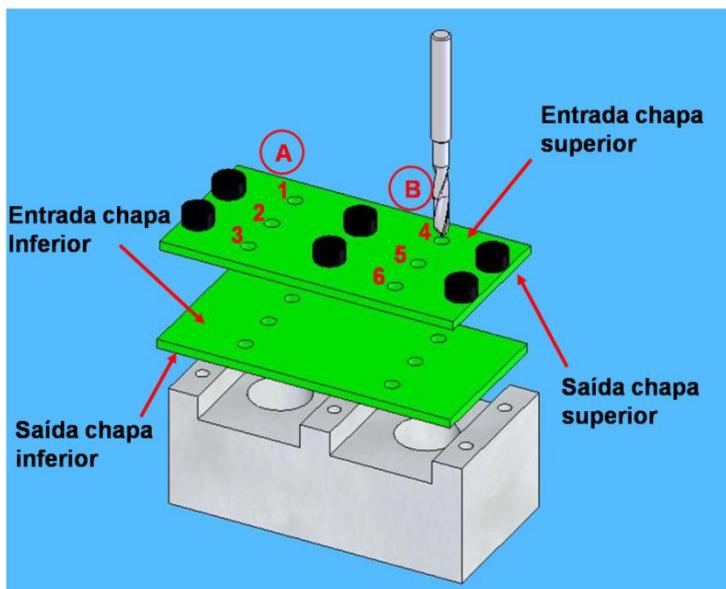


Figura 3. 13: Sequência dos furos realizados nos ensaios

Em ensaios mais refinados foi utilizada uma taxa de aquisição superior equivalente a 6000Hz com a finalidade de avaliar o comportamento da furação durante a transição da chapa superior para a inferior.

No amplificador de sinais do sistema de medição de força foi utilizado um filtro passa-baixa de 2kHz para evitar que se filtrassem sinais relevantes, uma vez que a frequência máxima esperada da ferramenta era de cerca de 300Hz. O filtro passa-alta foi selecionado para curto ($Short \tau = 340s$), que é o filtro recomendado para medições dinâmicas.

Um exemplo gráfico da resposta da força na direção de avanço da ferramenta é apresentado na Figura 3.14.

3.3.3 Medição da deformação (flexão)

O objetivo da medição da deformação (flexão) foi o de estimar o desvio, em várias faixas (Figura 3.15) ao longo da chapa em relação a uma superfície ideal. Essa superfície ideal era um modelo CAD da chapa inserido no programa MCosmos da Mitutoyo. Com isto cada ponto medido sobre a chapa (real) era comparado com o modelo CAD (que representava a chapa isenta de deformação). Assim obtinha-se o desvio entre a chapa deformada (após a usinagem) sendo medida e a chapa indeformada (modelo CAD). As medições foram realizadas na chapa inferior, uma vez que em ensaios preliminares esta foi a que deformou de maneira mais acentuada.

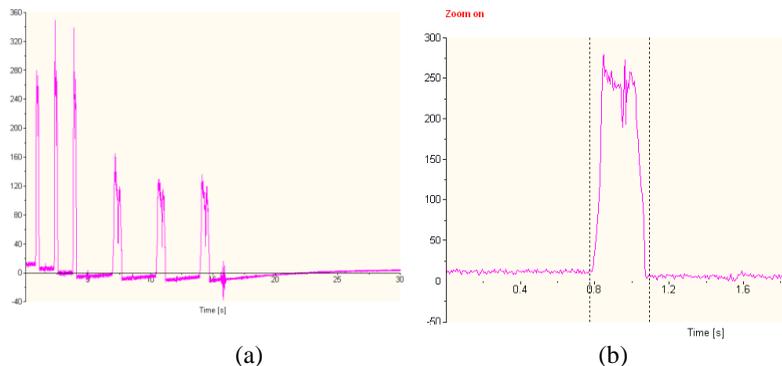


Figura 3. 14: (a) Gráfico da resposta da força pelo tempo para os seis furos de cada teste e (b) com seleção de faixa útil

Cada chapa foi medida em 164 pontos divididos em 4 faixas formando o arranjo mostrado na Figura 3.15. Os pontos em azul indicam os pontos onde a ponta de medição da MMC (*probe*) tocou a chapa realizando as medições. No APÊNDICE II os pontos são representados por cores diferentes indicando a quantidade de desvio da chapa medida em relação ao modelo CAD.

Em ensaios preliminares verificou-se o comportamento da flexão das chapas (Figura 3.16). Avaliando-se o gráfico foi visto que da faixa 1 para a 4 ocorreu um crescimento da flexão, ou seja, à medida em que a chapa era furada (furos 1, 2 e 3) o espaçamento entre as duas chapas aumentava. Isto acrescentou uma nova fonte de incerteza ao sistema, o

que fez com que durante a medição da altura da rebarba somente os furos 1 e 4 fossem medidos visando bloquear a nova variável.

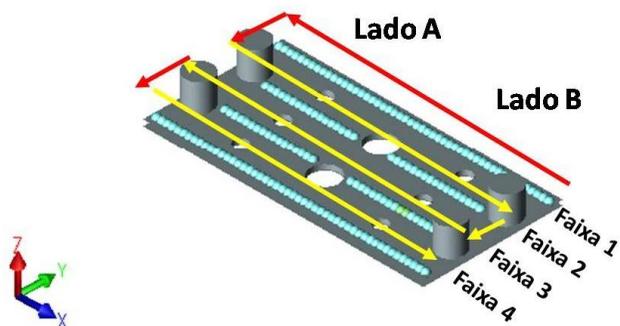


Figura 3. 15: Modelo CAD da chapa com os pontos medidos para avaliar a flexão das chapas

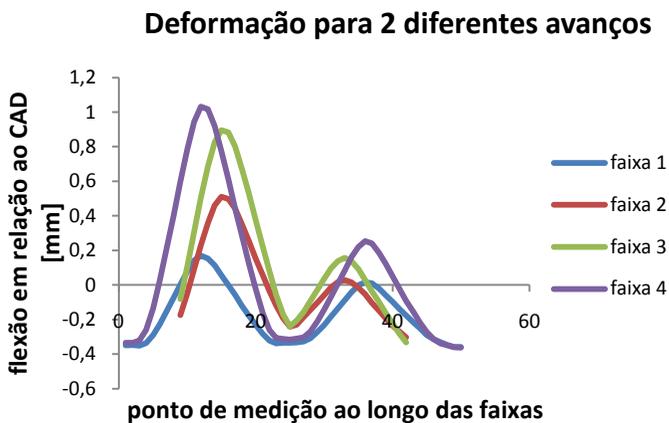


Figura 3. 16: Flexão das chapas para dois valores de avanço com a mesma broca e mesma velocidade de corte

3.3.4 Medição da altura de rebarba

A dimensão mensurada utilizada para a avaliação das rebarbas foi a altura destas. Rebarbas entre chapas, quanto mais altas, se tornam mais indesejáveis, pois não permitem o bom assentamento entre as duas chapas sobrepostas. Além disso, o sistema de medição utilizado não permite a medição de outras dimensões, como por exemplo, a espessura da rebarba.

As amostras foram levadas ao laboratório IFI (Instituto de Fomento e Coordenação Industrial) onde as medições de altura de rebarba foram realizadas em uma sala com temperatura controlada ($20^{\circ} \pm 1^{\circ}$ C).

Como confirmado em ensaios preliminares as chapas se deformaram durante os testes e o espaçamento entre estas pode influenciar diretamente o crescimento das rebarbas na interface. Os furos 1 e 4 (Figura 3.13) foram selecionados para medição da altura da rebarba na entrada e na saída dos mesmos bloqueando a influência de outras variáveis que poderiam ser decorrentes da escolha aleatória de um furo para medição. Para melhor avaliar a dispersão da altura da rebarba na borda dos furos, as rebarbas foram medidas em quatro pontos diferentes defasados cerca de 90° cada (Figura 3.17), conforme proposto em outros trabalhos [55].

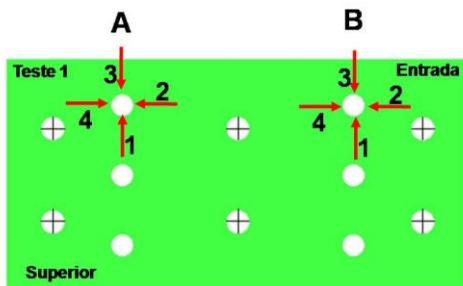


Figura 3. 17: Pontos de medição de altura de rebarba ao longo dos furos na entrada e na saída das chapas superiores e inferiores

Estes quatro pontos foram tomados na entrada e na saída dos furos 1 e 4 tanto da chapa superior quanto da inferior. Como foram usinadas 66 chapas e de cada uma destas foram medidos 16 pontos de altura de rebarba, no total foram feitas 1056 medições. Para coletar a altura de

rebarba o apalpador digital era posicionado o mais próximo possível da rebarba (Figura 3.18). Em seguida o indicador de medição era zerado.

A partir daí o conjunto suporte/apalpador era deslizado em direção ao centro do furo até se obter o valor máximo de altura de rebarba. Com os quatros pontos de altura de rebarba medidos calculava-se a média e o desvio padrão que serviram para a análise dos resultados.

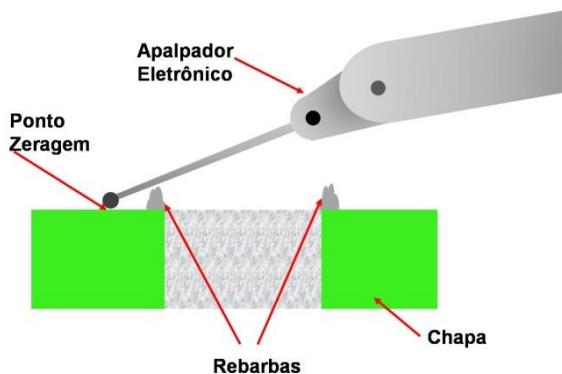


Figura 3. 18: Ponto de zeragem do apalpador eletrônico

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos nos ensaios com as várias brocas. Inicialmente cada broca é avaliada individualmente e em seguida é feita uma comparação entre as mesmas, destacando-se as influências de cada uma delas sobre o processo de furação.

4.1 Análise Individual da Furação com Diferentes Brocas

4.1.1 Broca 1 ($\delta=15^\circ$, d_p positiva)

Para analisar os resultados obtidos foi utilizado o programa Minitab com o qual os dados foram tratados. A ferramenta estatística utilizada para avaliar a influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de saída foi a análise de variância (ANOVA) realizada com o mesmo programa [56, 57, 58].

a) Altura de Rebarba

Antes de analisar os gráficos de altura de rebarba formadas na entrada da chapa superior, saída da chapa superior, entrada da chapa inferior e saída da chapa inferior foi realizada a análise de variância de dois fatores [58] avaliando-se a influência dos parâmetros de entrada (v_c e f) sobre o fator de saída denominado altura de rebarba.

Os resultados da influência de v_c e f sobre a altura de rebarba são apresentados a seguir. Nestes sendo avaliadas separadamente as influências sobre as rebarbas da entrada da chapa superior, saída da chapa superior, entrada da chapa inferior e saída da chapa inferior.

Entrada da chapa superior

Utilizando a análise de variância de dois fatores avaliou-se a primeira hipótese nula relacionada à velocidade de corte:

$H_0(v_c)$ - a velocidade de corte não exerce influência sobre os valores encontrados de altura de rebarba.

A Tabela 4.1 apresenta os valores da análise de variância obtidos com o programa Minitab. Para a ANOVA é utilizada a distribuição F, que é uma distribuição assimétrica à direita (Figura 4.1), ou seja, seus valores podem ser 0 ou positivos mas nunca negativos. O valor de corte F_{ct} em análise de variância permite rejeitar uma hipótese nula de que duas médias são iguais caso o valor encontrado de F seja maior que F_{ct} . De maneira simplificada o valor de F é uma razão entre a variância entre amostras pela variância dentro de amostras [58]. Os valores de F_c são tabelados e podem ser encontrados em vários livros de estatística [58].

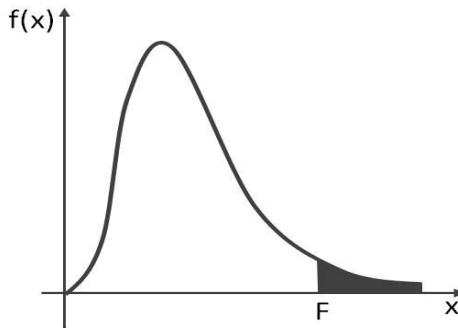


Figura 4. 1: Distribuição F

Tabela 4. 1: ANOVA da entrada da chapa superior para a broca 1

Fonte	GL	SQ	MQ	F	P
v_c	2	73,69	36,844	0,29	0,761
f	2	920,07	460,036	3,66	0,125
Erro	4	502,89	125,721		
Total	8	1496,64			

O valor de F encontrado para v_c foi de 0,29. Como o parâmetro v_c possui 2 graus de liberdade, o valor de F_{ct} de corte tabelado [56, 57, 58] é de 6,9443. Assim sendo, o valor $F=0,29$ encontra-se abaixo do valor de F_{ct} de corte, o que não permite que a hipótese nula $H_0(v_c)$ seja rejeitada. Com isto, não foi possível afirmar que a velocidade de corte teve influência significativa sobre a altura de rebarba formada na entrada da chapa superior. Apesar de esperado que a tensão de escoamento fosse reduzida com um aumento da temperatura, que é consequência de valores elevados de velocidade de corte [59, 60], esta condição não pôde ser constatada estatisticamente.

A segunda hipótese nula a ser testada é relativa ao avanço onde busca-se verificar a correlação entre o aumento do avanço e aumento da rebarba.

Ho(f)- o avanço não exerce influência direta sobre a altura de rebarba gerada

De acordo com a Tabela 4.1 o valor de F encontrado para o avanço foi de 3,66. Como o avanço possui dois graus de liberdade o valor F de corte é 6,9443. Assim o valor $F=3,66$ não excede o valor F de corte o que não permite rejeitar a hipótese nula Ho(f). Apesar de ser contrário ao esperado, estatisticamente não foi possível afirmar que f exerceu influência direta sobre a altura de rebarba na entrada da chapa superior.

Esta impossibilidade de análise da influência da velocidade e do avanço sobre a altura de rebarba gerada pode ser devida ao pequeno valor e insuficiente variação da altura de rebarba na entrada das chapas [8], que impossibilita a observância de uma correlação estatística.

Saída da chapa superior

Analisando-se a formação de rebarbas na saída da chapa superior obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2: ANOVA da saída da chapa superior para a broca 1

Fonte	GL	SQ	MQ	F	P
V_c	2	5990,2	2995,10	1,89	0,264
f	2	15158,9	7579,43	4,78	0,087
Erro	4	6338,9	1584,72		
Total	8	27487,9			

A primeira hipótese nula testada visava avaliar a influência da velocidade de corte v_c sobre a altura da rebarba gerada na saída da chapa superior:

Ho(v_c)- a velocidade de corte não exerce influência sobre os valores encontrados de altura de rebarba.

Outra forma de avaliar esta hipótese se dá pela interpretação do valor P, indicado nas Tabelas 4.1 e 4.2. O valor de P indica o mesmo resultado que o valor F, não sendo necessário levantar o valor F de corte que pode ser encontrado em tabelas de livros estatísticos. Para se interpretar o valor P basta saber o nível de confiança utilizado, que neste caso foi $\alpha_c=0,05$. Valores de P menores que 5% ou menores que 0,05 são indicadores de que o valor de corte foi excedido devendo ser a hipótese nula rejeitada.

Analisando-se o valor de $P=0,264$ para v_c verifica-se que a hipótese nula $H_0(v_c)$ não pôde ser rejeitada, uma vez que o nível de confiança utilizado foi de 95%. Ou seja, P deveria ser menor que 0,05 para que esta fosse rejeitada. Desta forma não é possível, estatisticamente, afirmar que v_c influenciou a formação da rebarba na saída da chapa superior ao se utilizar a broca 1.

Com o objetivo de avaliar a influência do avanço sobre a formação da rebarba nesta situação, a hipótese nula estabelecida foi:

$H_0(f)$ - o avanço não exerce influência direta sobre a altura de rebarba gerada

Pela Tabela 4.2, o valor de P para o avanço excede o de 0,05, o que não permite rejeitar a hipótese nula. Assim, mesmo sendo observado o contrário em alguns trabalhos [61] e inclusive observado em alguns gráficos de altura de rebarba (Figura 4.2), não foi possível correlacionar a formação de rebarba na saída da chapa superior com o avanço ao utilizar a broca 1.

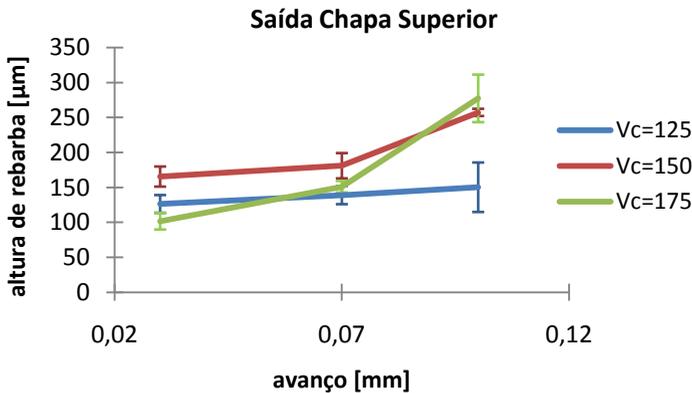


Figura 4. 2: Gráfico de altura de rebarba para diferentes valores de avanço e velocidade de corte

Entrada da chapa inferior

Aplicando-se a análise de variância para a entrada da chapa superior verificou-se que a primeira hipótese nula $H_0(v_c)$ (velocidade de corte não exerce influência sobre a altura da rebarba) não pôde ser rejeitada, uma vez que o valor de $P=0,239$ encontrado foi superior ao valor de 0,05. Assim não é possível afirmar que v_c exerce influência

sobre a altura de rebarba na entrada da chapa inferior quando se utiliza a broca 1.

Da mesma forma, a hipótese nula $H_0(f)$, que afirma não existir influência do avanço sobre a altura da rebarba, não pôde ser rejeitada.

Saída da chapa inferior

O teste para identificar os valores de F e P relativos à formação de rebarba na saída da chapa inferior que teve duas hipóteses nulas:

$H_0(v_c)$ - a velocidade de corte não exerce influência sobre os valores encontrados de altura de rebarba.

$H_0(f)$ - o avanço não exerce influência direta sobre a altura de rebarba gerada

Não foi possível rejeitar a hipótese $H_0(v_c)$, uma vez que o valor de $P=0,297$ para este parâmetro foi maior que 0,05. No entanto a hipótese nula $H_0(f)$ pôde ser rejeitada por ser o valor de $P=0,022$ menor que 0,05. Assim, a velocidade de corte não demonstrou influência direta, mas estatisticamente é possível dizer que o avanço está relacionado com a altura da rebarba formada na saída da chapa inferior (Figura 4.3) [62].

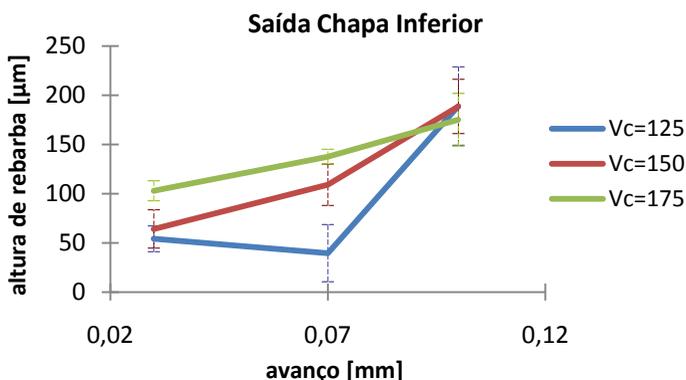


Figura 4. 3: Gráfico de variação da altura de rebarba para diferentes velocidades de corte e diferentes avanços

Foi feita ainda uma análise de variância para verificar se a posição e as chapas em que as rebarbas se encontravam (entrada chapa superior, saída chapa superior, entrada chapa inferior ou saída chapa inferior) interferiam na altura da rebarba gerada. A análise foi feita para as três velocidades de corte variando-se o avanço. Os resultados para $v_c=125$

m/min são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Nestas o termo “Chapa” se refere-se à chapa superior ou inferior, e os termos “Entrada” e “Saída” referem-se à localização da rebarba, se na entrada ou na saída das chapas. O termo f é o avanço que foi novamente inserido para permitir a comparação entre os fatores.

Tabela 4. 3: ANOVA $v_c=125\text{m/min}$ chapa/altura (h_0) brocal

Fonte	GL	SQ	MQ	F	P
f	2	6235,8	3117,90	0,89	0,460
Chapa	1	1841,4	1841,40	0,52	0,497
Interaction	2	2427,7	1213,86	0,34	0,722
Error	6	21132,0	3522,00		
Total	11	31636,9			

Tabela 4. 4: ANOVA $v_c=125\text{m/min}$ posição/altura(h_0) brocal

Fonte	GL	SQ	MQ	F	P
f	2	6235,8	3117,9	2,21	0,190
Posicao	1	14049,4	14049,4	9,98	0,020
Interaction	2	2901,7	1450,8	1,03	0,412
Error	6	8450,1	1408,3		
Total	11	31636,9			

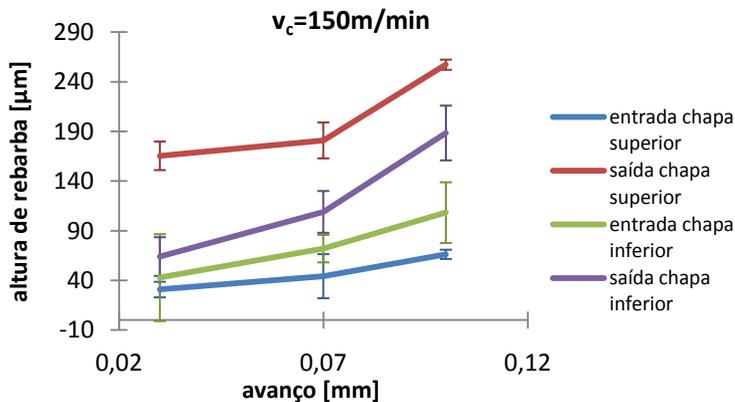
Verifica-se nas duas Tabelas o surgimento de uma nova linha denominada interação. Esta linha refere-se à interação entre os fatores avanço/posição ou avanço/chapa. Como em ambas as Tabelas os valores P das interações foram maiores do que o nível de confiança $\alpha=0,05$ a hipótese nula H_0 (interação), que afirma não existir correlação entre o avanço e a posição ou entre o avanço e chapa, não pode ser desprezada. Assim toda a interação entre os fatores avanço/posição e avanço/chapa pode ser desprezada e a análise segue como nos casos anteriores nos quais não existia a linha interação.

Para a velocidade de 125m/min somente a posição da rebarba esteve correlacionada com a altura da rebarba. Na Tabela 4.5 é apresentado o resumo das correlações dos fatores posição e chapa com o fator altura de rebarba.

Tabela 4. 5: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca1

$v_c=125\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim
$v_c=150\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim
$v_c=175\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim

De acordo com a tabela somente a posição influencia a altura da rebarba gerada, ou seja, se a chapa é superior ou inferior não é relevante. Importante estatisticamente é se a posição do furo analisada se encontra na saída ou na entrada da chapa. O gráfico da Figura 4.4 permite uma melhor visualização desta situação.

**Figura 4. 4:** Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=150\text{ m/min}$

Tendo em vista a chapa superior, nota-se neste gráfico que a rebarba encontrada na saída foi significativamente superior à da entrada. A mesma situação ocorreu na chapa inferior. Diferentes pesquisadores [8, 33, 59] afirmam que rebarbas na saída dos furos são maiores que aquelas geradas na entrada.

O gráfico da Figura 4.4 mostra que a rebarba na saída da chapa superior foi maior que a rebarba na saída da chapa inferior e que a rebarba na entrada da chapa inferior foi maior que a rebarba formada na entrada da chapa superior. Com isto, seria possível afirmar graficamente que as rebarbas formadas na interface entre as duas chapas foram superiores às outras. Apesar desta observação gráfica a análise de variância não permitiu concluir se as rebarbas formadas na chapa superior eram maiores ou menores que as formadas na chapa inferior.

Conforme será observado em situações posteriores, espera-se que as rebarbas formadas na interface entre as chapas sejam menores que as outras, ou seja, a situação representada na Figura 4.4 contradiz essa hipótese. Em pesquisas realizadas a presença de um material de suporte (*backplate*) sob a superfície da peça por onde a broca sai, deveria evitar o crescimento de rebarbas [7, 55]. Na situação em estudo a chapa inferior deveria funcionar como um material de suporte (*backplate*) para a chapa superior. Aparentemente algum fenômeno alterou a situação, o que será melhor avaliado nas seções 4.2.3 e 4.2.5.

b) Força de avanço e momento

Com o sistema de aquisição de dados de força descrito no capítulo 3 foi possível a obtenção de valores de força na direção de avanço da ferramenta e de momento em torno do eixo de giro da ferramenta.

Foi realizada a análise de variância dos dados obtidos com a broca 1 considerando-se a relação dos parâmetros de entrada v_c e f com os parâmetros de saída, a saber, força de avanço e momento.

Formulada a primeira hipótese nula $H_0(v_c)$, que afirma não existir influência da velocidade de corte sobre a força na direção de avanço, observou-se que esta hipótese não pôde ser rejeitada. Como o valor de $P=0,333$ foi superior a $0,05$ não se pode afirmar, com bases estatísticas, que a velocidade de corte influenciou a força gerada na direção de avanço (Figura 4.5). Pela Figura, nota-se que um aumento do avanço acarretou maiores forças na direção de avanço e que a influência

da velocidade de corte não apresentou um padrão muito claro, o que foi confirmado pela ANOVA.

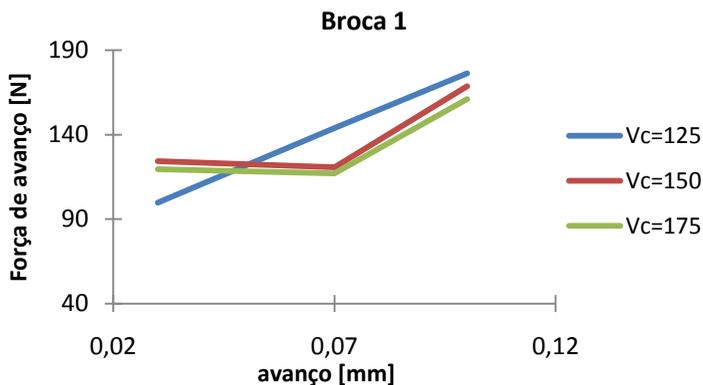


Figura 4. 5: Variação da força na direção de avanço para diferentes valores de avanço e de velocidade

A segunda hipótese nula $H_0(f)$ afirma não existir influência do avanço sobre a força gerada na direção de avanço. O valor de $P=0,000$ encontrado na análise de F_f para esta broca demonstrou que a hipótese nula pode ser rejeitada. Rejeitada a hipótese nula, pode-se afirmar que o avanço exerce influência direta sobre a força F_f .

Com os resultados da análise de variância obtidos para os momentos não foi possível avaliar qualquer influência da velocidade de corte ou do avanço sobre os momentos gerados durante os testes com a broca 1. Estes resultados não foram condizentes àqueles obtidos em outros trabalhos [63], nos quais a velocidade de corte influenciou diretamente os valores do momento torçor. Os valores encontrados de $P=0,109$ e $P=0,525$ para $H_0(v_c)$ e $H_0(f)$, respectivamente, foram superiores a 0,05, o que não permite a rejeição das hipóteses nulas.

Um aumento da velocidade de corte proporciona um aumento da temperatura do material usinado, que por sua vez aumenta a ductilidade do material [59, 64]. Esse aumento da ductilidade faz com que as forças necessárias para deformar o material sejam menores. Aparentemente as variações de v_c não foram significativas (125m/min a 175m/min) para se obter uma variação clara da força F_f e do momento M_z . Peña *et al* [8] afirmaram existir uma dependência direta entre a ductilidade do material e a altura da rebarba gerada.

No entanto, a variação do avanço apresentou uma correlação significativa com a força de avanço, mas não com o momento (Figura 4.6). Com o aumento do avanço a seção de corte realizada pela ferramenta também aumenta [60]. Com isso é esperada uma maior força necessária para cisalhar e deformar esta maior quantidade de material, o que conseqüentemente gera uma maior força na direção de avanço e aumento do momento de torção. Segundo Bastos [60] esse aumento da força com o aumento da seção de corte só ocorre se o valor do avanço for superior ao raio de quina da ferramenta, que é a situação verificada neste trabalho. Micheletti *apud* Castillo [41], afirma que um aumento do avanço proporciona uma seção de corte maior, que por sua vez gera um volume maior de material sendo retirado a cada rotação da ferramenta. Esse volume maior precisa ser expelido pelo canal da broca, que possui uma área constante. Um volume maior de cavaco gera maior atrito com as paredes do furo ao percorrer o canal da broca, o que dificulta ainda mais o avanço da ferramenta.

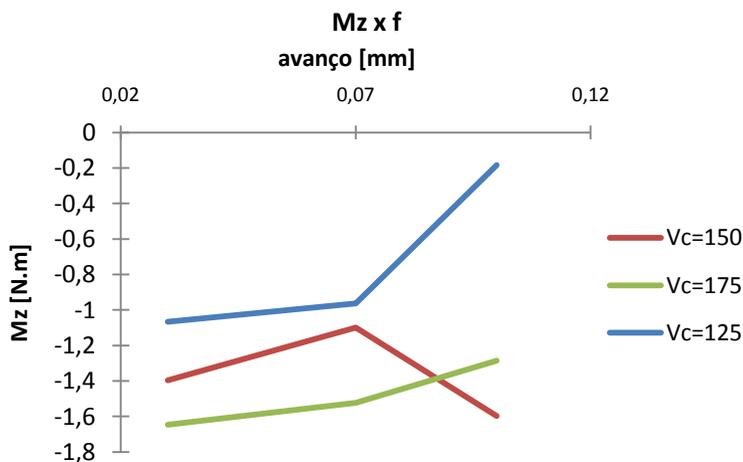


Figura 4. 6: Variação do momento para diferentes valores de avanço e de velocidade

A seguir, é feita a análise das brocas restantes utilizando a mesma metodologia aplicada à broca 1 Desta forma os resultados da ANOVA serão mostrados de maneira simplificada em tabelas específicas.

4.1.2 Broca 2 ($\delta=15^\circ$, d_p nula)

a) Altura de Rebarba

Seguindo o mesmo modelo anterior, foi feita a análise de variância para a broca 2. É indicado na Tabela 4.6 quando v_c e f influenciaram a altura da rebarba gerada na entrada da chapa superior, na saída da chapa inferior e assim por diante.

Tabela 4. 6: Broca 2, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)

Broca 2		Influência sobre a altura de rebarba	
Chapa	Posição	v_c	f
		Superior	entrada
saída	não		não
Inferior	entrada	não	não
	saída	não	sim

Analisando-se a Tabela verifica-se que dos dois parâmetros v_c e f , somente f demonstrou estatisticamente exercer influência sobre a altura de rebarba formada. Esta influência só pôde ser observada na saída da chapa inferior (Figura 4.7). Segundo resultados encontrados por alguns pesquisadores, espera-se que as rebarbas geradas na saída dos furos sejam significativamente afetadas pela mudança do avanço, onde avanços maiores produzem maiores rebarbas [33, 59, 61, 62]. Mais uma vez supõe-se a ocorrência de fenômenos inesperados na região da interface entre as chapas superior e inferior, o que poderá ser mais bem avaliado nas seções 4.2.3 e 4.2.5.

Pela fórmula de Daar [66] para determinação da força de avanço (Equação 4.1), verifica-se que o avanço (f) influencia diretamente na força de avanço F_f :

$$F_f = C_2 \cdot D^{x_2} \cdot f^{y_2} \quad (4.1)$$

Em vista disso, maiores forças na direção de avanço implicam em maiores deformações de material na saída da chapa, que por sua vez levam a maiores rebarbas [67].

Pelo gráfico da Figura 4.7 é possível visualizar que um aumento do avanço gerou maiores alturas de rebarbas na saída da chapa, o que é concordante com a literatura pesquisada.

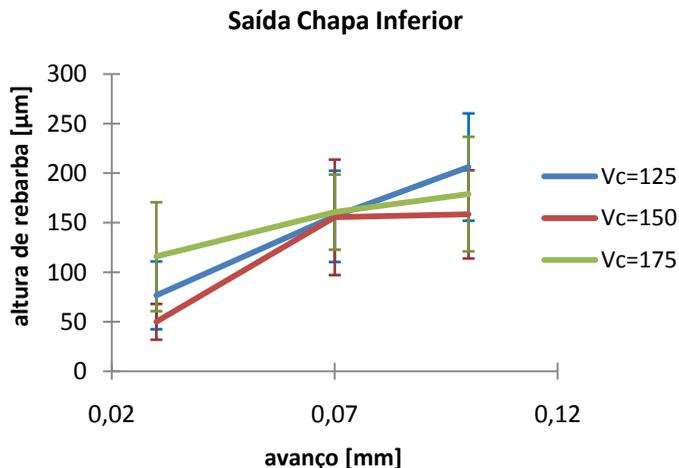


Figura 4. 7: Gráfico da altura de rebarba na saída da chapa inferior para a variação do avanço e da velocidade de corte

Foi realizada mais uma vez a análise de variância para verificar se a posição e a chapa em que a rebarba se encontrava interferiam na altura da rebarba gerada. A análise foi feita para as três velocidades de corte variando-se o avanço (Tabela 4.7).

Estes resultados indicam que, com bases estatísticas, não foi possível avaliar se as rebarbas da saída ou da entrada da chapa superior são maiores ou menores que as rebarbas geradas na chapa inferior. Uma das razões para este fato pode ser devido à elevada variação de altura de rebarba encontrada quando se utilizava esta broca com ponta de centragem rente às quinas. O desempenho deste tipo de broca em relação às outras será melhor avaliado na seção 4.2.2.

Tabela 4. 7: ANOVA posição/altura (h_0) e chapa/posição Broca 2

$v_c=125\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=150\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=175\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não

b) Força de avanço e momento

Os valores obtidos de força na direção de avanço e os valores do momento torçor para a broca 2 foram submetidos à ANOVA de dois critérios (Tabela 4.8).

Tabela 4. 8: ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força

Broca 2	Influência sobre a força e o momento torçor	
Parâmetro	v_c	f
Força (F_t)	não	não
Momento	sim	não

Segundo a Tabela os valores de P referentes a v_c e f impossibilitaram uma correlação estatística entre estes fatores e a força de avanço gerada, lembrando-se que esta afirmação é válida para um nível de confiança de 95%. Para a avaliação do momento torçor a variação de v_c

afeta diretamente o momento torçor (Figura 4.8). Apesar dos fatores serem estatisticamente correlacionados, os resultados deste gráfico não mostram uma coerência com a literatura, ou seja, maiores velocidades não foram responsáveis por menores momentos torçores. Mais uma vez, a baixa variação entre a máxima v_c utilizada e a mínima possivelmente impediu a observação de uma influência deste fator sobre o momento torçor.

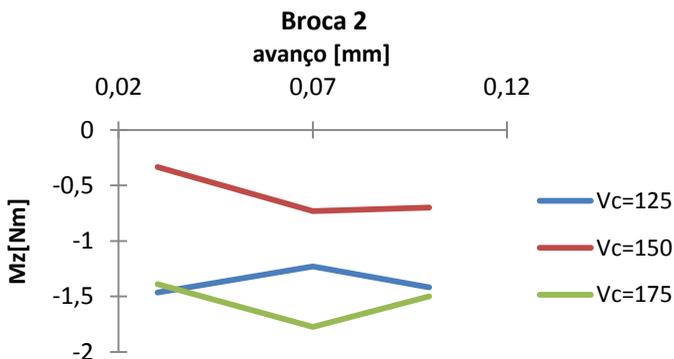


Figura 4. 8: Variação do momento para diferentes valores de avanço e de velocidade

4.1.3 Broca 3 ($\delta=30^\circ$, d_p positiva)

a) Altura de Rebarba

Os resultados da ANOVA realizados com testes da broca 3 podem ser visualizados na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9: Broca 3, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)

Broca 3		Influência sobre a altura de rebarba	
Chapa	Posição	v_c	f
		Superior	entrada
	saída	não	sim
Inferior	entrada	não	sim
	saída	não	não

Segundo os resultados obtidos a velocidade de corte e o avanço influenciaram diretamente a altura da rebarba gerada na entrada do furo da chapa superior (Figura 4.9).

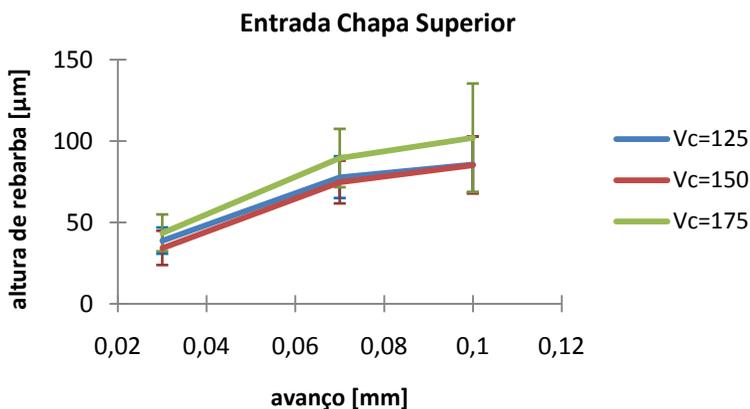


Figura 4. 9: Gráfico da altura de rebarba na entrada da chapa superior para a variação do avanço e da velocidade de corte

Pelo gráfico da Figura 4.9 a maior velocidade de corte gerou os maiores valores de rebarba. Segundo alguns autores, maiores velocidades de corte produzem um aumento da temperatura do material usinado e, conseqüentemente, um aumento da ductilidade deste [22, 59, 67, 68]. Segundo alguns destes autores, materiais mais dúcteis tendem a formar maiores rebarbas.

Ao realizar a ANOVA para verificar se a posição da rebarba e da chapa na qual esta se encontrava exerciam influência sobre a altura da rebarba formada obtiveram-se os resultados indicados na Tabela 4.10.

Tabela 4. 10: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca 3

$v_c=125\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim
$v_c=150\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim
$v_c=175\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim

Em nenhuma das análises foi identificada uma correlação entre a chapa onde a rebarba se encontrava (superior ou inferior) e a altura desta última. No entanto, estatisticamente foi comprovada a correlação entre a posição da rebarba com sua altura (Figura 4.10).

De acordo com o gráfico as maiores rebarbas foram as da saída dos furos, tanto da chapa inferior quanto da superior, sendo esta afirmação embasada estatisticamente. Isso pode ser devido à forma como o corte é realizado na entrada do furo, onde o gume da ferramenta está sempre entrado na peça. Isto é diferente do que ocorre na saída (essa situação é válida somente quando as superfícies por onde a ferramenta sai forem planas), onde o gume está sempre saindo da peça [10].

Graficamente, as rebarbas geradas na saída da chapa superior foram maiores que as geradas na saída da chapa inferior. Apesar de ser graficamente visível que as rebarbas formadas na interface foram maiores que as outras, estatisticamente esta afirmação não é válida.

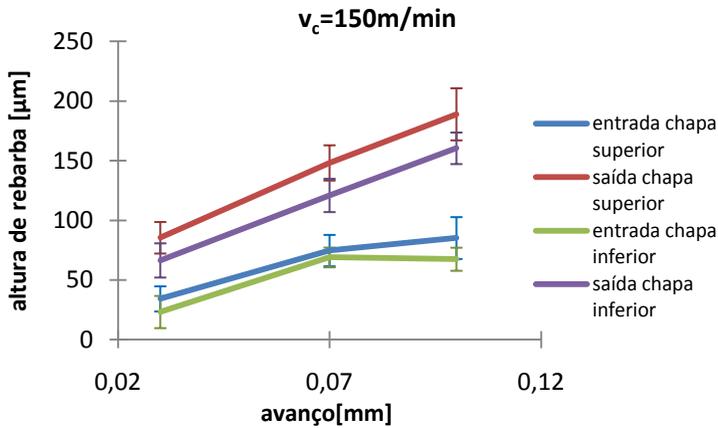


Figura 4. 10: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=150$ m/min

b) Força de avanço e momento

A Tabela 4.11 apresenta o resumo das correlações encontradas ao se aplicar a ANOVA aos dados de força e momento coletados nos ensaios com a broca 3.

Tabela 4. 11: Broca 3, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força

Broca 3	Influência sobre a força e o momento torçor	
	v_c	f
Força (F_f)	não	sim
Momento	não	não

O avanço foi o único fator estatisticamente relacionado, sendo sua relação restrita à força na direção de avanço (F_f) (Figura 4.11). O momento, apesar de ser teoricamente correlacionado, não apresentou nenhuma relação neste experimento.

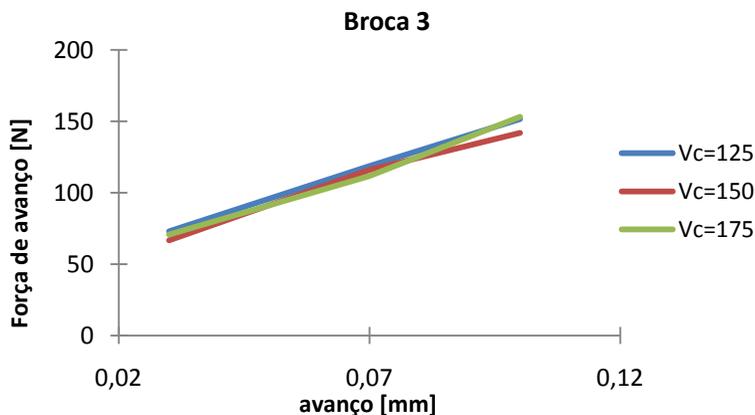


Figura 4. 11: Gráfico das forças na direção de avanço para diferentes avanços e velocidades de corte

4.1.4 Broca 4 ($\delta=30^\circ$, d_p nula)

a) Altura de Rebarba

A broca 4 apresentou valores diferentes de todas as outras brocas. Nas brocas avaliadas anteriormente havia pelo menos um parâmetro em uma posição (entrada chapa superior, saída chapa superior etc.) que apresentava relação com a altura da rebarba. Com a broca 4 em nenhum caso pôde-se observar uma correlação estatisticamente significativa para um nível de confiança de 95% entre os parâmetros (v_c e f) e a altura de rebarba gerada (Tabelas 4.12).

Tabela 4. 12: Broca 4, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)

Broca 4		Influência sobre a altura de rebarba	
Chapa	Posição	v_c	f
		Superior	entrada
	saída	não	não
Inferior	entrada	não	não
	saída	não	não

Feita a ANOVA para verificar a influência da posição da rebarba e da chapa onde esta foi formada obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4. 13: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca 4

$v_c=125\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=150\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=175\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não

Conforme a análise nenhum dos fatores, posição e chapa, apresentou relação estatística para um nível de confiança de $\alpha_e=0,05$. Com relação aos gráficos desta situação nenhuma afirmação pode ser feita.

b) Força de avanço e momento

Na Tabela 4.14 pode-se observar que somente a velocidade de corte exerceu influência significativa sobre o momento. A influência esperada do avanço sobre a força de avanço não pôde ser verificada.

Tabela 4. 14: Broca 4, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força

Broca 4	Influência sobre a força e o momento torçor	
	v_c	f
Parâmetro	v_c	f
Força (F_f)	não	não
Momento	sim	não

4.1.5 Broca 5 ($\delta=45^\circ$, d_p nula)

a) Altura de Rebarba

Os dados obtidos durante a usinagem com a broca 5 apresentaram características similares ao ensaio feito com a broca 1. Com a broca 5 não ocorreu correlação significativa entre os parâmetros (v_c e f) e a altura da rebarba gerada em nenhuma posição a não ser para a saída da chapa inferior onde somente o avanço apresentou relação estatística (Tabela 4.15).

Tabela 4. 15: Broca 5, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)

Broca 5		Influência sobre a altura de rebarba	
Chapa	Posição	v_c	f
		Superior	entrada
saída	não		não
Inferior	entrada	não	não
	saída	não	sim

O gráfico da Figura 4.12 mostra como um aumento do avanço proporciona um crescimento da altura da rebarba na saída da chapa inferior. Não foi verificada significância entre a variação da velocidade e a variação da altura de rebarba.

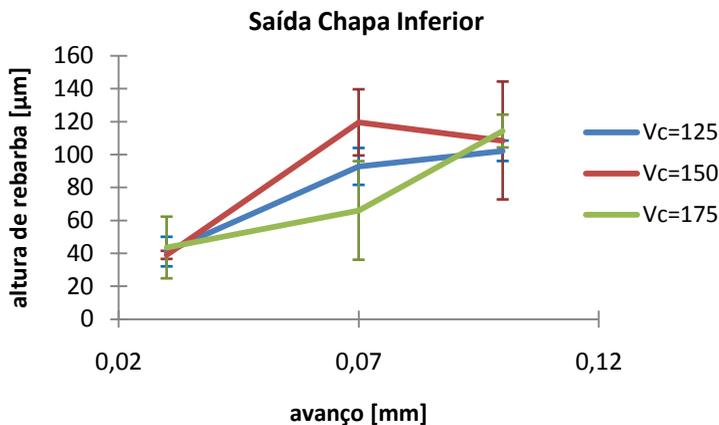


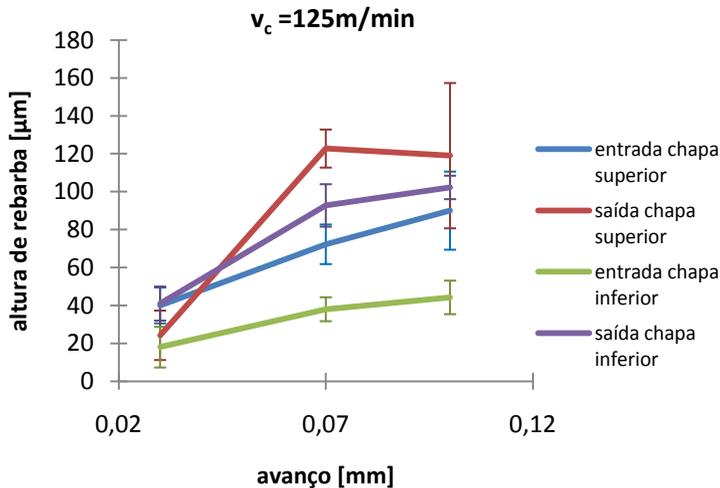
Figura 4. 12: Gráfico da altura de rebarba na saída da chapa inferior para a variação do avanço e da velocidade de corte

A avaliação da influência sobre a altura da rebarba considerando a posição da rebarba e a chapa na qual esta se encontrava pode ser visualizada na Tabela 4.16.

Observando-se a Tabela percebe-se que o único fator que influenciou a altura da rebarba gerada foi a posição desta, se na entrada ou na saída do furo (Figura 4.13). Estatisticamente a chapa onde a rebarba se encontrava não influenciou a altura desta última. No gráfico a altura de rebarba gerada na saída das chapas foi maior que as geradas na entrada seguindo a tendência dos casos anteriores, não sendo possível fazer outras afirmações estatisticamente.

Tabela 4. 16: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca 5

$v_c=125\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim
$v_c=150\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=175\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim

**Figura 4. 13:** Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=125$ m/min

b) Força de avanço e momento

Os resultados da ANOVA obtidos avaliando-se a influência da velocidade de corte e do avanço sobre a força e o momento torçor (Tabela 4.17) confirmam que o avanço exerceu influência sobre a força de avanço. Os outros parâmetros não apresentaram correlação.

Tabela 4. 17: Broca 5, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força

Broca 5	Influência sobre a força e o momento torçor	
	v_c	f
Força (F_f)	não	sim
Momento	não	não

4.1.6 Broca 6 ($\delta=45^\circ$, d_p nula)

a) Altura de Rebarba

Os resultados obtidos com a usinagem feita pela broca 6 mostraram relevância estatística na relação entre a velocidade de corte e a altura de rebarba gerada ao se avaliar a entrada da chapa superior. Todas as outras opções não apresentaram correlação significativa (Tabela 4.18).

Os valores da ANOVA para avaliar a correlação dos fatores chapa e posição com a altura da rebarba gerada são contidos na Tabela 4.19.

Tabela 4. 18: Broca 6, ANOVA altura (h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)

Broca 6		Influência sobre a altura de rebarba	
Chapa	Posição	v_c	f
		Superior	entrada
saída	não		não
Inferior	entrada	não	não
	saída	não	não

Tabela 4. 19: ANOVA posição/altura (h_0) e chapa/posição Broca 6

$v_c=125\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=150\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim
$v_c=175\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Sim

Os resultados mostram mais uma vez que somente a posição exerceu influência sobre a altura de rebarba gerada (Figura 4.14). Neste gráfico a altura das rebarbas na saída das chapas foi superior àquelas encontradas na entrada, sendo estatisticamente a única inferência permitida.

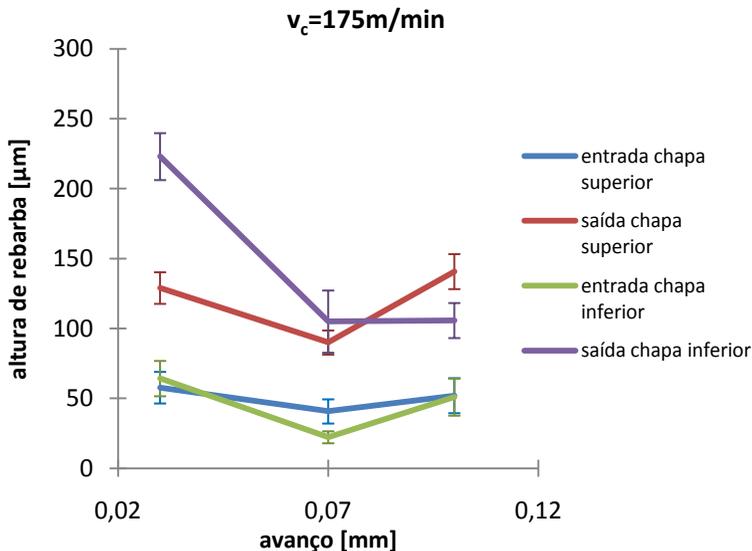


Figura 4. 14: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=175$ m/min

b) Força de avanço e momento

Analisando os resultados de força e momento obtidos durante a usinagem com a broca 6 somente o avanço apresentou correlação com a força de avanço (Tabela 4.20 e Figura 4.15).

Tabela 4. 20: Broca 6, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força

Broca 6	Influência sobre a força e o momento torçor	
	v_c	f
Força (F_f)	não	sim
Momento	não	não

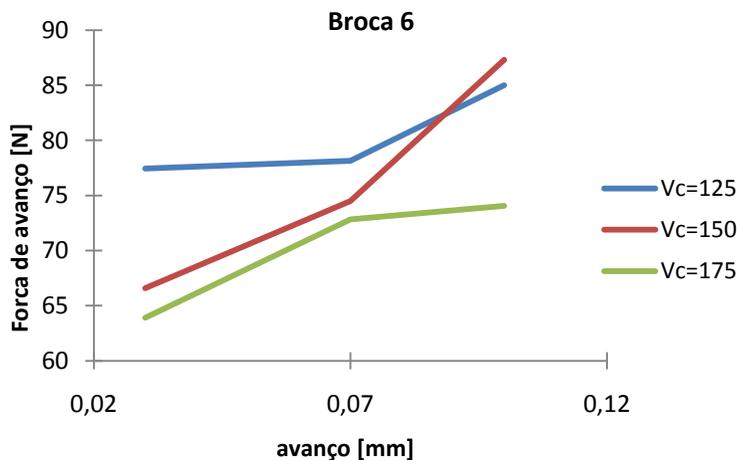


Figura 4. 15: Gráfico da força na direção de avanço para diferentes valores de avanço e velocidade de corte

4.1.7 Broca EMB ($\delta=30^\circ$)

a) Altura de Rebarba

Os resultados obtidos com a broca EMB mostraram que somente as rebarbas geradas na saída da chapa inferior estavam correlacionadas ao avanço. Todas as outras situações não demonstraram correlação relevante (Tabela 4.21).

Tabela 4. 21: Broca EMB, ANOVA altura(h_0) versus avanço (f) e velocidade de corte (v_c)

Broca EMB		Influência sobre a altura de rebarba	
Chapa	Posição		
		v_c	f
Superior	entrada	não	não
	saída	não	não
Inferior	entrada	não	não
	saída	não	sim

A análise de variância referente à broca EMB (Tabela 4.22) foi a única dentre todas as outras brocas que evidenciou a existência de uma influência entre o fator chapa e altura de rebarba (Figura 4.16).

Tabela 4. 22: ANOVA posição/altura(h_0) e chapa/posição Broca EMB

$v_c=125\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=150\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Não
Posição	Não
$v_c=175\text{m/min}$	
Fator	Altura de rebarba
Chapa	Sim
Posição	Não

Neste gráfico verifica-se que as rebarbas maiores foram produzidas na saída da chapa inferior. A rebarba na saída da chapa superior foi menor no caso da broca EMB, diferentemente das situações encontradas com as outras brocas. Graficamente as rebarbas geradas na entrada de ambas as chapas foram bastante reduzidas se comparadas às outras, apesar de estatisticamente não ser possível apoiar esta análise. Na seção 4.2 será feita a comparação entre as diferentes brocas a fim de se observar quais foram aquelas que apresentaram os melhores desempenhos.

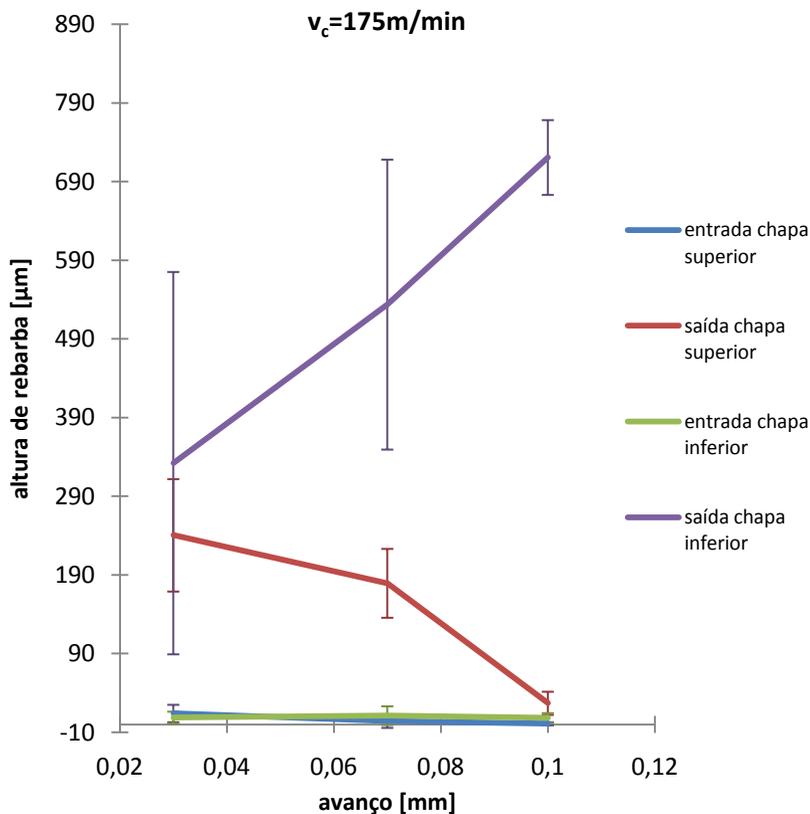


Figura 4. 16: Gráfico da variação de altura de rebarba em função do avanço para diferentes localizações da rebarba com $v_c=175\text{m/min}$

b) Força de avanço e momento

A broca EMB apresentou resultados que permitem relacionar somente o avanço à força de avanço (Tabela 4.23). Todos os outros não demonstraram correlação. Nota-se na Figura 4.17 que um aumento do avanço resultou em maiores forças de avanço.

Tabela 4. 23: Broca EMB, ANOVA avanço e velocidade de corte versus momento e força

Broca EMB	Influência sobre a força e o momento torçor	
	v_c	f
Parâmetro	v_c	f
Força (F_f)	não	Sim
Momento	não	Não

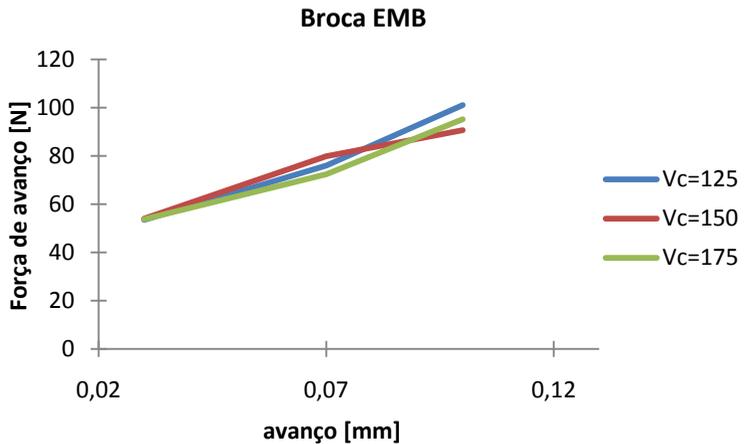


Figura 4. 17: Gráfico da força na direção de avanço para diferentes valores de avanço e velocidade de corte

Observando-se os resultados obtidos para as 7 brocas testadas, nota-se uma dificuldade em se realizar correlações estatísticas com a formação da rebarba entre as chapas. A razão para essa falta de relevância estatística dos dados de altura de rebarba nessa região pode ser explicada por uma formação de rebarba irregular que ocorreu entre as chapas. Como será analisado em tópicos posteriores, a rebarba formada na interface entre as duas chapas apresentou distribuição irregular, com acúmulo excessivo em algumas regiões.

4.2 Comparação entre Furos Obtidos com Diferentes Brocas

Nesta seção é feita a comparação entre as brocas a fim de avaliar quais apresentaram os melhores resultados. Na comparação são analisadas as alturas das rebarbas geradas na entrada e na saída das chapas superiores e inferiores. Após a análise da rebarba é feita uma avaliação dos resultados de força, momento e da flexão das chapas para comparar a qualidade das brocas.

Antes de avaliar qualquer um dos gráficos, fez-se a ANOVA para verificar se a mudança de geometria teve influência comprovada sobre a formação de rebarba (Tabela 4.24).

Conforme observado na Tabela, somente para a rebarba gerada na entrada da chapa superior com velocidade de corte de 175m/min não foi possível verificar uma correlação entre o fator broca e altura de rebarba.

Tabela 4. 24: ANOVA correlação entre parâmetro geometria de broca utilizado e altura de rebarba

v_c [m/min]	Influência sobre a altura de rebarba		
	Chapa	Posição	Broca
125	Superior	Entrada	sim
		Saída	sim
	Inferior	Entrada	sim
		Saída	sim
150	Superior	Entrada	sim
		Saída	sim
	Inferior	Entrada	sim
		Saída	sim
175	Superior	Entrada	não
		Saída	sim
	Inferior	Entrada	sim
		Saída	sim

4.2.1 Saída chapa inferior

Analisando-se a Figura 4.18 nota-se que o emprego da broca EMB acarretou as maiores alturas de rebarba na saída da chapa inferior. Como predito no capítulo 2, brocas com pontas convencionais tendem a deformar de maneira acentuada a parte central, principalmente pela presença do gume transversal [41, 43] e também devido a um ângulo de ponta de aproximadamente 128° . Estas condições presentes neste tipo de broca fazem com que a ruptura do material durante a saída da broca se dê na parte central do furo, gerando uma rebarba elevada (Figura 4.28) [32, 33, 48].

A broca 2 também gerou rebarbas acentuadas em comparação às outras brocas especiais. Esta apresentava o menor ângulo de saída, o que fez com que o fator de recalque fosse acentuado [41]. Um elevado fator de recalque faz com que a deformação do cavaco seja acentuada e também eleva a dificuldade da broca avançar na direção axial [63]. Esses fatores elevam a força na direção axial, o que é propício à formação de rebarbas na saída da chapa. Pelo gráfico é possível visualizar que a broca 5, que possuía o maior ângulo de saída, apresentou baixos valores de altura de rebarba se comparada às demais.

4.2.2 Entrada Chapa Inferior

Avaliando-se o gráfico da Figura 4.19 visualiza-se que a menor rebarba gerada na entrada da chapa inferior foi decorrente da usinagem com a broca EMB. A broca 2, que é uma broca com ponta de centragem rente às quinas (d_p nula), apresentou os piores resultados de altura de rebarba na entrada da chapa. A broca 4, que também possui d_p nula, gerou rebarbas elevadas se comparada às demais.

Pelo gráfico, as rebarbas geradas pelas brocas com ponta de centragem d_p nula (brocas 2, 4 e 6), apresentaram valores superiores de altura de rebarba se comparadas às brocas de mesmo ângulo de hélice com d_p positivo (brocas 1, 3 e 5). Esta formação de rebarbas na entrada da chapa com brocas d_p nula pode ser decorrente de uma má centragem da broca, ou falta de direcionamento da mesma. Brocas com d_p positiva apresentam uma ponta protuberante capaz de guiá-las melhor ao longo do furo. Aparentemente a falta de centragem provocou uma oscilação da

broca reduzindo a qualidade do furo no início do processo, e assim geraram-se rebarbas na entrada das chapas [42].

As diferenças nos resultados de altura de rebarba com brocas de centragem foram mais nítidas para a entrada da chapa inferior do que para a saída desta mesma chapa.

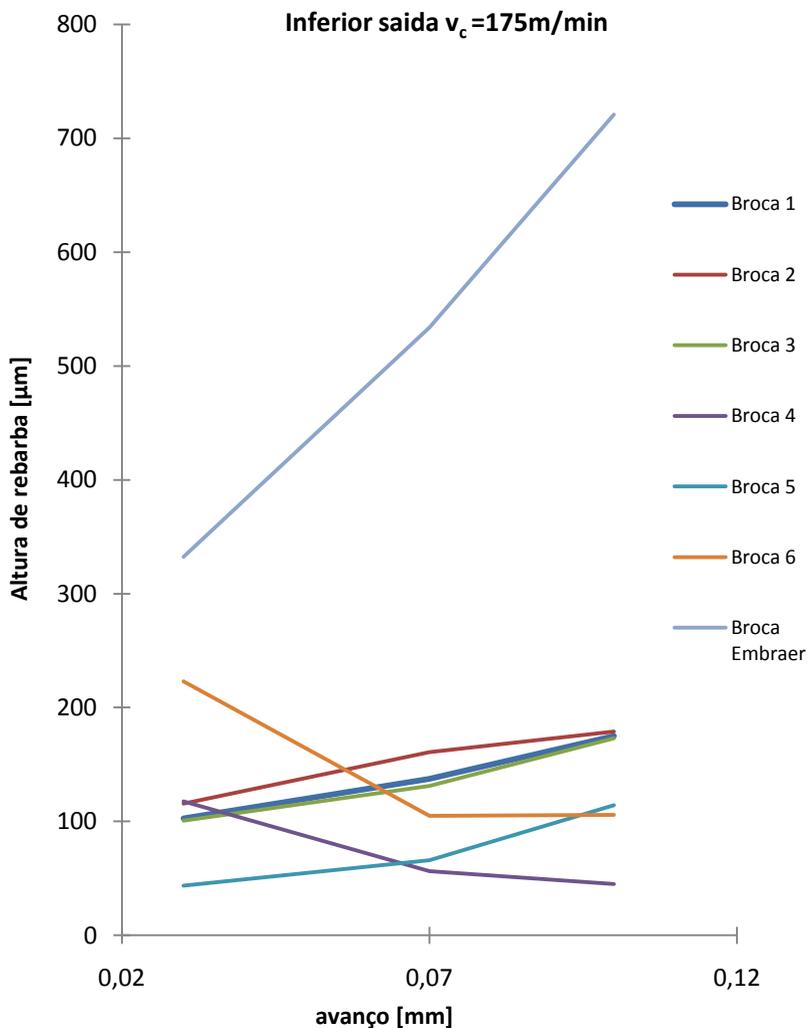


Figura 4. 18: Comparação da altura de rebarbas entre as brocas para diferentes avanços para $v_c = 175\text{m/min}$

Entre as brocas com ponta de centragem as que apresentaram os menores valores de altura de rebarba foram as brocas 5 e 6, que possuíam o maior ângulo de hélice empregado ($\phi = 45^\circ$). Como dito, ângulos de hélice maiores implicam em ângulos de saída maiores e que por sua vez geram menores deformações do material usinado devido a um menor fator de recalque. Menor deformação implica em um corte mais suave de material, o que pode ser a causa de menores rebarbas geradas na entrada das chapas.

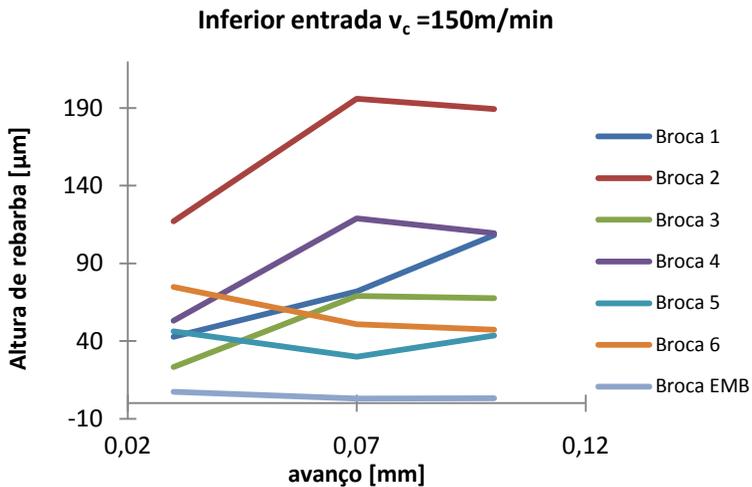


Figura 4. 19: Altura de rebarba para as várias brocas com diferentes avanços à velocidade de 150m/min na entrada da chapa inferior

4.2.3 Saída chapa superior

Avaliando-se o gráfico referente às rebarbas obtidas na saída da chapa superior (Figura 4.21) nota-se que as brocas 1 e 2 apresentaram valores elevados de altura de rebarba. As rebarbas formadas pela broca EMB foram significativamente menores que as geradas por outras brocas. É importante ressaltar que a região onde estas rebarbas se encontravam era uma região de interface entre as duas chapas. Nessa região espera-se uma resposta diferente na formação de rebarbas.

Kim *et al* [69] estudaram a influência de materiais de suporte (*backplate*) em processos de furação de materiais como alumínio, cobre e aço inoxidável ABNT 304. Estes pesquisadores verificaram que a

capacidade do material resistir, quando a broca se aproximava da saída do furo, era muito pequena sem o *backplate*. Em testes com materiais frágeis a situação seria semelhante à da Figura 4.20, onde o *backplate* sustentou os esforços finais da furação evitando que o material se rompesse. Para materiais mais dúcteis os pesquisadores verificaram que a utilização do material de suporte evitava o crescimento da rebarba.

Como neste estudo foram usinadas chapas sobrepostas, a chapa inferior funcionou como um material de suporte (*backplate*). Com isso era esperado que as rebarbas formadas na interface (saída do furo superior e entrada do furo inferior) fossem menores que as outras (entrada do furo superior e saída do furo inferior) [9, 55].

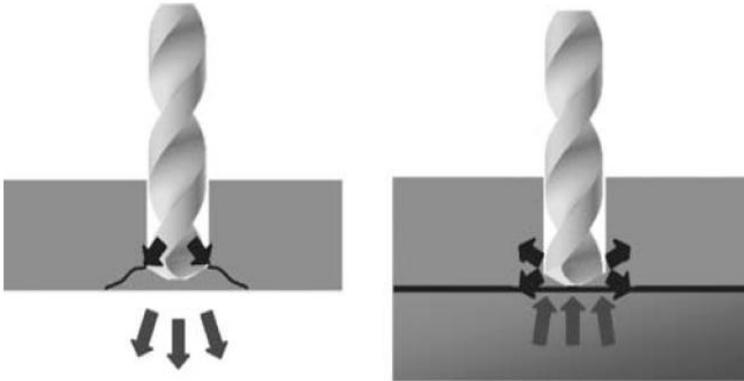


Figura 4. 20: Furação de materiais frágeis sem e com a presença de materiais de suporte [69]

Nos ensaios realizados, aparentemente a função de *backplate* da chapa inferior não foi muito clara. A altura das rebarbas medidas, formadas na saída das chapas superiores, foi acentuada e em alguns casos foi maior que aquelas formadas na saída do furo inferior (onde não existia o *backplate*). Uma das razões que levaria a essa situação seria a flexão acentuada das chapas que, conforme demonstrado nas Figuras 2.8 a 2.11, impossibilitaria que a chapa inferior atuasse como *backplate*. Desta forma as rebarbas na saída da chapa superior não encontrariam impedimento ao seu crescimento. No entanto, essa justificativa ainda não explica o fato das rebarbas serem maiores na interface, isto será melhor elucidado na seção 4.2.5.

As rebarbas formadas na saída da chapa superior apresentaram um padrão semelhante àquele encontrado na saída da chapa inferior. Devido a este padrão não foi possível observar se as brocas com ponta d_p nula geraram rebarbas maiores que as brocas com d_p positiva (Figura 4.21).

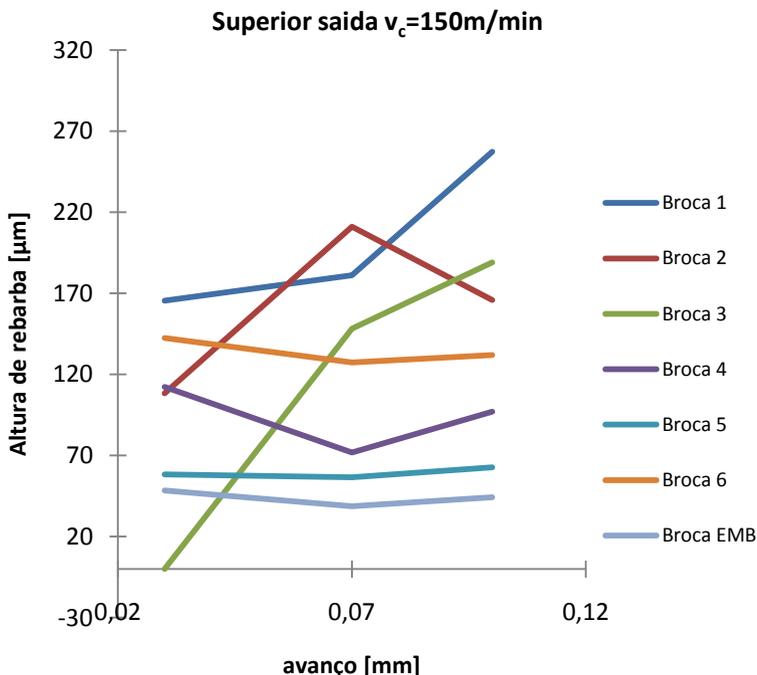


Figura 4. 21: Altura de rebarba para as diferentes brocas variando o avanço, mantendo-se $v_c=150\text{m/min}$ analisando a saída da chapa superior

4.2.4 Entrada chapa superior

Avaliando-se os resultados de altura de rebarba na entrada da chapa superior, as rebarbas maiores foram geradas durante a usinagem com as brocas 2 e 6 (Figura 4.22). Os resultados obtidos com a broca EMB mostraram que estas foram as que acarretaram menor altura de rebarba. Neste gráfico, pôde ser observado que as brocas com ponta d_p nula (brocas 2, 4 e 6) apresentaram as maiores rebarba em comparação

com as brocas com ponta d_p positiva (brocas 1, 3 e 5). Este mesmo padrão foi observado e analisado nas rebarbas formadas na entrada da chapa inferior.

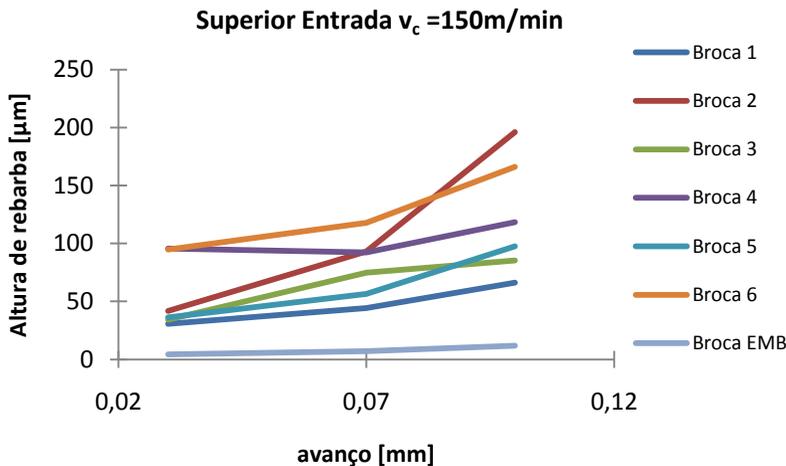


Figura 4. 22: Altura de rebarba na entrada da chapa superior para $v_c=150\text{m/min}$ variando o avanço

Nota-se pelos resultados apresentados na seção 4.2 que a broca EMB foi a que gerou menores valores de altura de rebarba na interface entre as chapas. Isto pode ser observado por meio dos resultados obtidos para a entrada da chapa inferior e saída da chapa superior (Figuras 4.19 e 4.21). É interessante, neste ponto, avaliar-se a flexão gerada nas chapas, pois caso a flexão nas chapas perfuradas pela broca EMB tenha sido pequena, pode-se concluir que a ausência de espaçamento entre as chapas não permitiu o crescimento de rebarbas. Esta análise será feita a seguir na seção 4.2.5.

Analisando-se os resultados obtidos até o momento, nota-se que a broca EMB foi a que apresentou menores valores de rebarba na entrada dos furos. Apesar destes pontos positivos ela foi a que gerou piores valores de rebarba na saída da chapa inferior. A broca 5, se comparada às outras brocas especiais, apresentou os melhores valores de rebarba na maioria das situações. Principalmente na interface entre as chapas, ela apresentou valores pequenos que podem ser devidos a uma baixa força de avanço e a uma baixa flexão das chapas.

4.2.5 Forças na furação

As forças de avanço e momentos torçores encontrados durante os ensaios foram submetidos a uma análise de variância visando verificar se a mudança de geometria de brocas apresentava correlação com as forças e os momentos gerados. Os resultados desta análise podem ser visualizados na Tabela 4.25, onde todas as velocidades de corte e mudanças de geometria da broca (fator broca) apresentaram correlação com os fatores força e momento.

Tabela 4. 25: ANOVA correlação entre o parâmetro geometria de broca utilizado com a força e o momento

v_c	Fator	Broca
125m/min	Força	sim
	Momento	sim
150m/min	Força	sim
	Momento	sim
175m/min	Força	sim
	Momento	sim

Conforme os gráficos das Figuras 4.23 a 4.25, a broca de número 2 foi a que gerou as maiores forças de avanço. A broca EMB apresentou valores pequenos de força de avanço se comparada às demais.

Analisando os gráficos nota-se que a brocas 2 e 4, com pontas d_p nulas, proporcionaram maiores forças de avanço quando comparadas às brocas 1 e 3 com ponta d_p positiva (Tabela 3.1). Analisando-se separadamente os dois grupos de pontas de brocas (d_p nula e d_p positiva) foi possível observar que um aumento do ângulo de hélice e consequentemente do ângulo de saída da ferramenta (mais positivo), geraram forças de avanço menores. Estes resultados já foram discutidos anteriormente e são consequência de uma diminuição do fator de recalque que gera menores forças de corte e de avanço [40,70, 71].

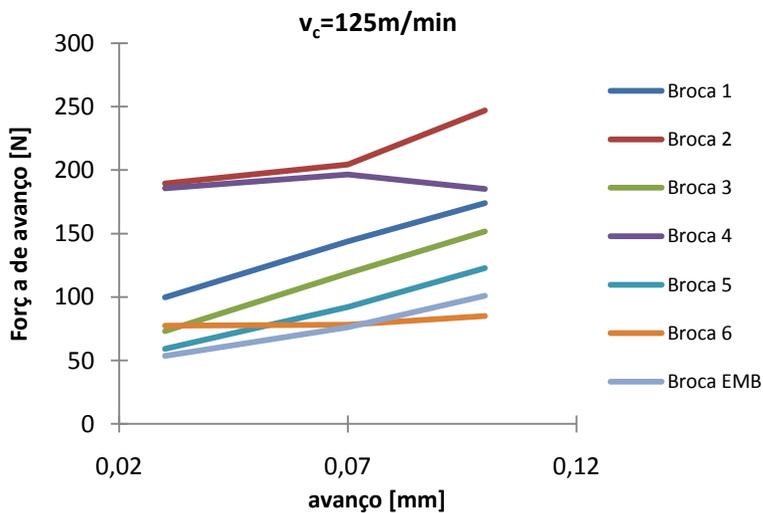


Figura 4. 23: Comparação das forças de avanço para as diferentes brocas variando-se o avanço e mantendo-se $v_c = 125 \text{ m/min}$

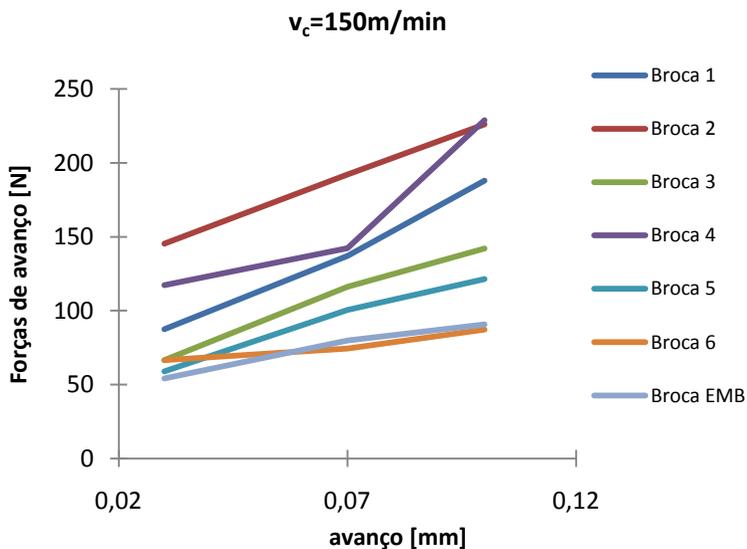


Figura 4. 24: Comparação das forças de avanço para as diferentes brocas variando-se o avanço e mantendo-se $v_c = 150 \text{ m/min}$

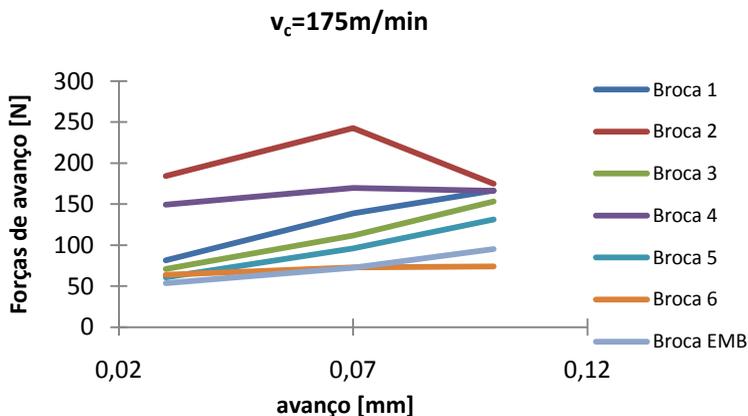


Figura 4. 25: Comparação das forças de avanço para as diferentes brocas variando-se o avanço e mantendo-se $v_c=150\text{m/min}$

Antes da análise detalhada do comportamento das forças com taxas de aquisição elevadas em ensaios mais refinados (seção 3.3.2) serão avaliados a forma e o tipo das rebarbas geradas durante a furação das chapas.

Entrada da chapa superior

Apesar da ordem de grandeza da altura das rebarbas variar de uma broca para a outra, o tipo das rebarbas formadas na entrada da chapa superior foi similar em todas as brocas utilizadas. Para a entrada da chapa superior o tipo de rebarba foi uniforme (Figura 2.30) distribuída ao longo do furo com altura aproximadamente constante (Figura 4.26).



Figura 4. 26: Formação da rebarba na entrada da chapa superior

Saída da chapa superior

Ao serem investigadas as rebarbas formadas na saída da chapa superior dois padrões diferentes foram observados. Em um primeiro caso a rebarba apresentava altura aparentemente constante ao longo de toda a saída do furo, como na Figura 4.26. Em outra situação encontrada a rebarba se acumulava em algumas seções do furo indicando alturas elevadas durante a medição (Figura 4.27). Este tipo de rebarba foi gerado principalmente pelas brocas com d_p nula. Avaliando esta rebarba gerada, supõe-se que este excesso de material aderido seja causado por um esmagamento da rebarba tipo “chapéu”, que se formava na saída da chapa superior, contra a chapa inferior (isto será explicado com maiores detalhes no próximo tópico). Esta formação só poderia ser possível se ocorresse uma flexão das chapas e existisse um espaçamento entre as chapas (Figura 2.10), o que requer uma análise que será feita em seções posteriores.



Figura 4. 27: Formação da rebarba na saída da chapa superior acumulada em uma região do furo

Entrada da chapa inferior

As rebarbas observadas na entrada da chapa inferior foram semelhantes àquelas formadas na entrada da chapa superior, ou seja, rebarbas de altura uniforme. No entanto, em algumas situações raras, a rebarba se acumulou em regiões da entrada do furo (Figura 4.28), formando uma rebarba do tipo III (Figura 2.23), que se encurvou para dentro da peça. Essa curvatura permite inferir que existia um espaço pequeno para o crescimento da rebarba na interface entre as chapas e a rebarba foi flexionada durante o seu crescimento (Figura 2.12).



Figura 4. 28: Formação da rebarba na entrada da chapa inferior

Saída da chapa inferior

Na saída da chapa inferior pôde-se observar melhor como as rebarbas se formavam no processo de furação de chapas finas. Para a avaliação, as brocas foram divididas em três grupos: brocas com d_p nula, brocas com d_p positiva e brocas EMB.

Broca com ponta d_p positiva

As rebarbas geradas após a usinagem com brocas de ponta d_p positiva possuíam altura constante ao redor do furo e se distribuíram uniformemente. Ao final da usinagem surgiam “chapéus” que se destacavam completamente da chapa (Figura 4.29). Na literatura [22] estes mesmos resultados foram encontrados ao se usinar materiais dúcteis. Estes “chapéus” apresentavam uma protuberância ao centro devido à condição da ponta da broca avançada em relação à quina. A parte externa do “chapéu” (parte verde devido ao *primer*) apresentava uma forma cônica, sendo que na parte interna a superfície possuía uma forma mais plana.



Figura 4. 29: Rebarba tipo “chapéu” feita com a broca de ponta de centragem com d_p positiva

Broca com ponta d_p nula

Avaliando-se as rebarbas formadas na saída da chapa inferior com as brocas de ponta d_p nula confirmou-se que as rebarbas eram contínuas ao redor da saída do furo com altura constante. Ao contrário das brocas com ponta d_p positiva, estas brocas não formaram protuberância no centro do “chapéu”. A parte externa apresentou forma mais plana ficando a interna cônica. O “chapéu” formado com estas brocas apresentou espessura superior à encontrada no caso anterior.



Figura 4. 30: Rebarba tipo “chapéu” feita com a broca de ponta de centragem com d_p nula

Broca EMB com ponta convencional

Utilizando a broca EMB que possuía afiação convencional, as rebarbas formadas na saída da chapa inferior foram de dois tipos. Ambas possuíam rebarbas intermediárias que se distribuíam com altura uniforme ao longo do furo com formação de “chapéu”. A diferença entre elas se encontrava no “chapéu”, que em algumas situações se destacava completamente e em outras permanecia ligado à saída do furo (Figura 4.31 e 4.32).

O “chapéu” completamente destacado que se formava durante a furação com esta broca possuía espessura fina se comparado àqueles formados com outras brocas. A parte interna e externa do “chapéu” (Figura 4.32) era cônica acompanhando o perfil da ponta da broca [48].



Figura 4.31: Rebarba tipo “chapéu” aderida à saída do furo feita com a broca EMB



Figura 4.32: Rebarba tipo “chapéu” totalmente destacada feita com a broca EMB

Análise da transição entre as chapas

A fim de detalhar o processo de formação de rebarba entre as chapas, ou seja, quando a broca passava da chapa superior para a inferior, foi realizado um ensaio onde a usinagem foi interrompida neste momento (este ensaio foi feito com as brocas d_p nula, d_p positiva e EMB). Observou-se que o “chapéu” também se formava na saída da chapa superior e ficava aderido à ponta da ferramenta. Isto indica que possivelmente a broca se movimentava na direção de avanço sobre a chapa inferior sem ter a capacidade de cortá-la. Com este fenômeno só seria possível iniciar a usinagem quando o “chapéu” fosse eliminado da ponta da ferramenta. Caso essa observação seja correta as forças de avanço serão maiores quando a espessura do “chapéu” for maior. Como consequência a deformação da chapa inferior será maior.

A seguir as duas variáveis, força de avanço e flexão da chapa inferior serão avaliadas.

No gráfico da Figura 4.33, é apresentado o resultado da força de avanço para uma broca com d_p positiva. Observa-se que o gráfico se divide em duas partes, sendo a primeira parte referente à usinagem da chapa superior e a segunda da chapa inferior. Percebe-se ainda a transição de uma chapa para a outra, onde uma queda abrupta da força ocorre.

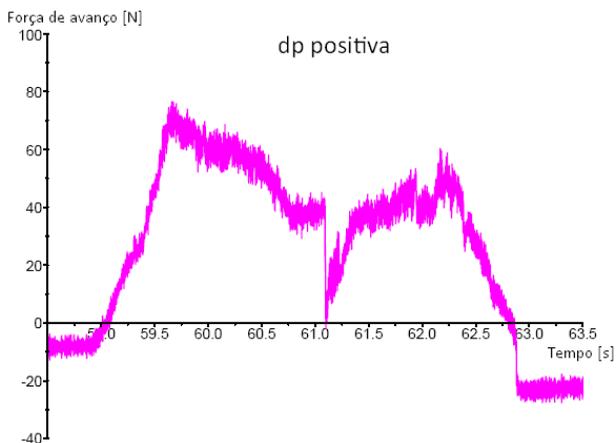


Figura 4.33: Gráfico da força de avanço com a broca de ponta de centragem 5 ($\delta = 45^\circ$, d_p positiva) para furação de duas chapas sobrepostas com altas taxas de aquisição (tempo em segundos e força em Newtons)

A broca EMB apresentou igualmente um pequeno pico na transição entre uma chapa e outra(Figura 4.34).

A broca com ponta d_p nula apresentou um pico de força de avanço muito superior àqueles observados nas duas brocas anteriores durante a transição entre as chapas (Figura 4.35). A confirmação deste fato sustenta a afirmação de que “chapéus” mais espessos aderidos à ponta da broca geram maiores forças de avanço que outros de espessura menor durante a transição de uma chapa para a outra.

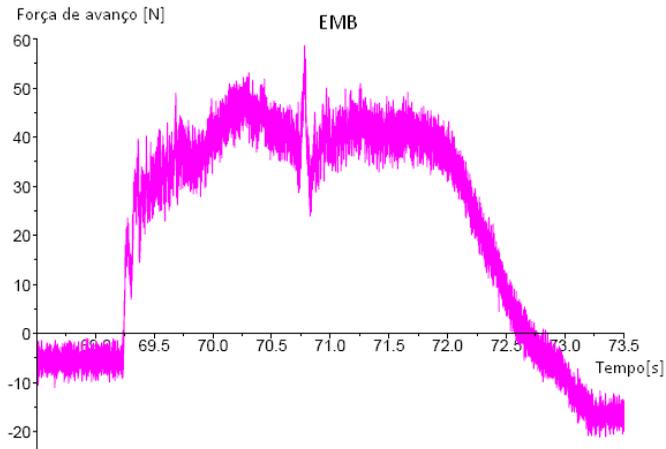


Figura 4. 34: Gráfico da força de avanço com a broca EMB para furação de duas chapas sobrepostas com altas taxas de aquisição (tempo em segundos e força em Newtons)

Resta confirmar ainda se as brocas de d_p nula, que produziam “chapéus” mais espessos, foram aquelas que deformaram mais as chapas inferiores durante a transição da chapa superior para a inferior.

Análise da flexão das chapas

O gráfico de flexão apresentado na Figura 4.36 é resultado de medições feitas ao longo da chapa inferior, conforme explicado no capítulo 3. Neste gráfico cada curva representa o perfil da chapa ao longo da faixa 4, sendo cada curva referente a uma broca específica (seção 3.3.3).

Pela análise no gráfico nota-se que as brocas com d_p nula (brocas 2, 4 e 6) apresentaram maiores valores de flexão das chapas se compa-

radas às brocas de mesmo δ com d_p positiva (brocas 1, 3 e 5). A flexão causada pela broca EMB possuía os menores valores.

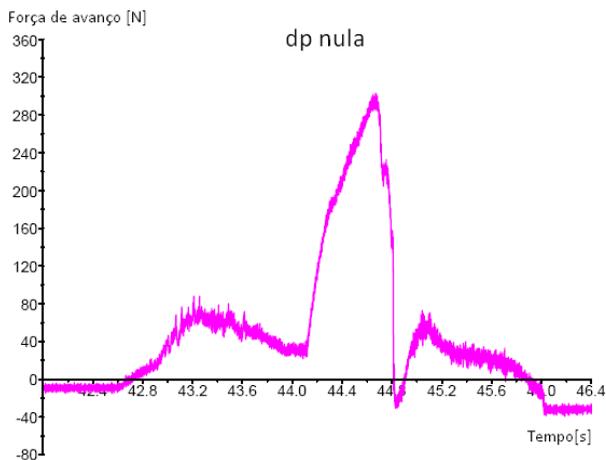


Figura 4.35: Gráfico da força de avanço com a broca de ponta centralizada 6 ($\delta = 45^\circ$, d_p nula) para furação de duas chapas sobrepostas com altas taxas de aquisição (tempo em segundos e força em Newtons)

Os valores obtidos de flexão confirmam a hipótese de que os “chapéus” de maior espessura geram maiores deflexões sobre as chapas inferiores. Espessuras elevadas de “chapéu” fazem com que a broca avance por mais tempo com o “chapéu” aderido à sua ponta, ou seja, por mais tempo a broca avança sem cortar material, apenas conformando a chapa inferior.

Os gráficos das Figuras 4.37 e 4.38 complementam a análise da flexão gerada quando comparada a broca 1 (d_p positiva) com a broca 2 (d_p nula). Nestes gráficos os desvios entre a chapa medida (chapa inferior) e o modelo CAD (que representa uma chapa plana sem deformação) são representados para várias condições de avanço e de velocidade. Verifica-se que as deflexões causadas pela broca 2 que possui d_p nula foram superiores às proporcionadas pela broca 1 que tem d_p positiva.

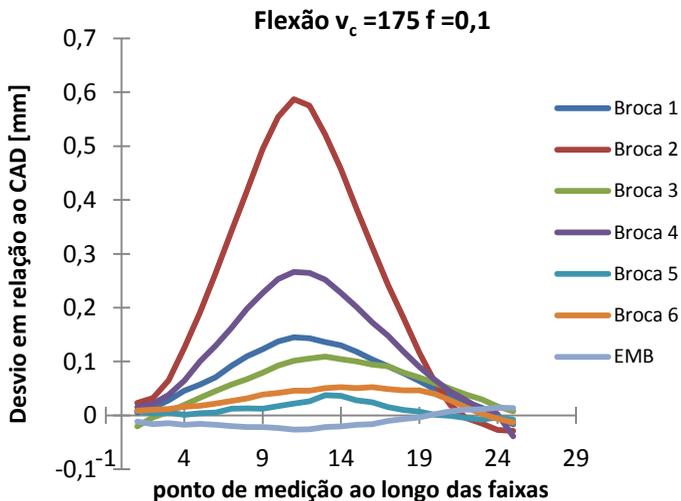


Figura 4. 36: Deformação das chapas para as diferentes brocas $v_c=175$ m/min e $f=0,1$ mm medidos na faixa 4

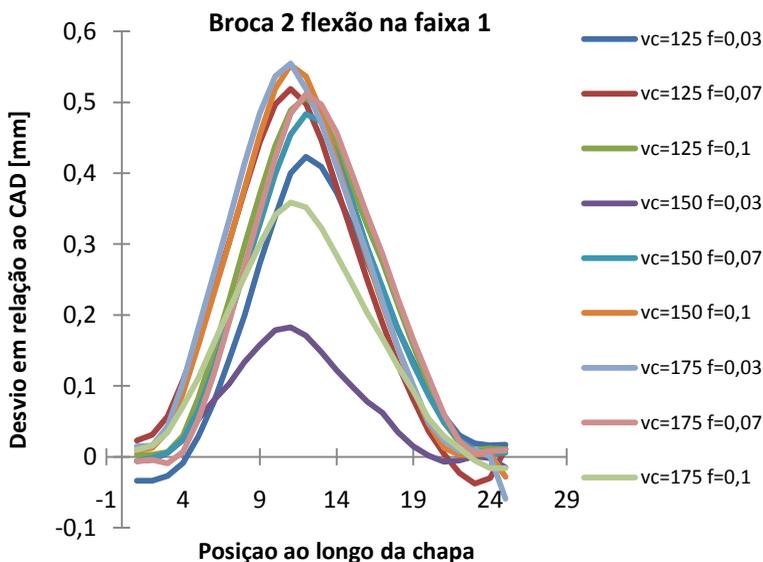


Figura 4. 37: Deformação medida ao longo da faixa 4 para a broca 2 levando em conta a variação do avanço medido em 25 pontos ao longo da faixa

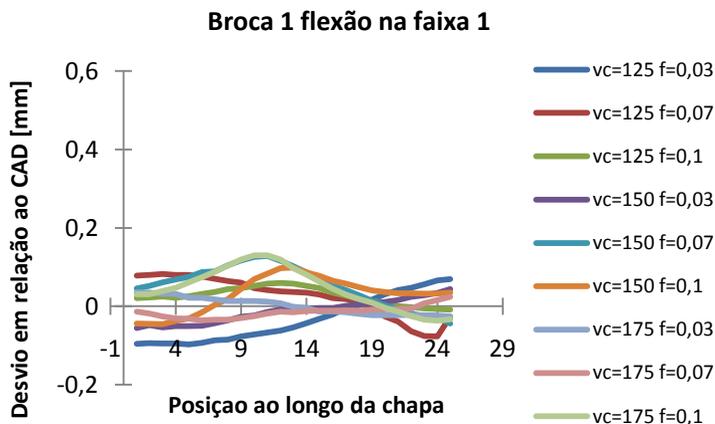


Figura 4. 38: Deformação medida ao longo da faixa 4 para a broca 1 levando em conta a variação do avanço medido em 25 pontos ao longo da faixa

Estes resultados obtidos confirmam a hipótese de que as rebarbas formadas na interface foram maiores aonde a flexão das chapas inferiores foi maior, gerando um maior espaçamento entre as chapas sobrepostas. Como observado, a broca que gerou maiores rebarbas na interface foi a broca 2, semelhantemente, esta mesma broca (Figura 4.38) foi a que gerou as maiores flexões nas chapas. Dentre as brocas especiais, a de número 5 foi a que apresentou os menores valores de flexão e de altura de rebarba. A broca EMB foi a que menos fletiu o conjunto e ainda a que apresentou menores valores de rebarba na interface.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Como observado ao longo da análise, foi possível estabelecer uma relação entre os parâmetros de corte e as rebarbas geradas. As brocas 1, 2, 5 e EMB apresentaram um padrão semelhante em que a análise de variância só permitiu correlacionar o parâmetro avanço com a rebarba gerada na saída das chapas inferiores. Na entrada das chapas, esta falta de correlação poderia ser justificada pela baixa formação de rebarbas, que não permitia uma variação significativa capaz de correlacionar os fatores. A dificuldade em avaliar a influência do avanço sobre as rebarbas geradas entre as chapas pode ser explicada pela formação irregular de rebarbas, principalmente na saída da chapa superior. Esta formação irregular fez com que porções elevadas de rebarbas ficassem aderidas à superfície da peça em algumas regiões. Este tipo de rebarba, que ocorreu somente nesta região, é supostamente uma consequência do esmagamento do “chapéu” formado na saída da chapa superior e pressionado contra a chapa inferior. Aparentemente, este tipo de rebarba aderida só existiu devido a um espaçamento entre as chapas que permitiu que o material usinado escoasse na direção radial da broca. As brocas que mais geraram este tipo de rebarba foram as brocas com ponta d_p nula, nas quais a força de avanço e a flexão das chapas foram maiores.

A velocidade de corte apresentou pouca relação estatística com a altura da rebarba gerada. Somente as brocas 3 e 6 apresentaram alguma correlação na entrada da chapa superior. Apesar de ser esperado que um aumento da velocidade de corte produzisse maiores rebarbas devido a um aumento da temperatura e consequente aumento da ductilidade do material usinado, esta situação não foi possível de ser avaliada. Uma das razões para isso poderia ser devido à pequena faixa de variação de v_c , que foi de um mínimo de 125m/min a um máximo de 175m/min.

Pela análise de variância, as brocas 1, 3, 5, 6 e EMB apresentaram um padrão similar, em que o avanço da ferramenta esteve correlacionado (correlação embasada estatisticamente) com as forças geradas na direção de avanço. Isso era esperado, uma vez que um aumento da seção de corte com elevação do avanço gera um volume maior de cavaco atritando com a parede do furo. Além disso, espessuras maiores geram forças efetivas de corte maiores resistindo ao avanço da ferramenta. Atra-

vés da análise dos gráficos foi possível visualizar que valores maiores de avanço geraram maiores forças de avanço. Analisando-se ainda a influência do avanço sobre o momento torçor, não foi possível correlacionar estes dois fatores pela análise de variância. Isto contradiz o esperado pela teoria, que prevê aumentos nas forças de avanço e nos momentos torçores com um aumento da seção de corte do material. Com relação a estes aspectos são necessários estudos futuros para uma análise mais detalhada.

A velocidade de corte não apresentou qualquer correlação significativa com as forças de avanço geradas. Um aumento da velocidade de corte do material deveria produzir uma elevação da temperatura, fazendo com que o material da peça fosse cisalhado com maior facilidade, o que não foi observado nos testes. No entanto, uma justificativa para isso seria a faixa estreita de velocidades utilizada que não permitiu uma avaliação desta influência. Observando-se os momentos torçores gerados, as brocas 2 e 4 demonstraram correlação estatística, utilizando-se a ANOVA. Contudo, os gráficos não apresentaram valores condizentes com a teoria, pois maiores velocidades produziram maiores torques e menores velocidades produziram valores intermediários de torque.

A posição onde as rebarbas se encontravam, se na entrada ou saída dos furos, apresentou correlação com a altura das rebarbas em algumas situações. As rebarbas geradas na entrada dos furos foram, na maioria dos casos, menores que as geradas na saída dos furos. Como previsto na literatura, as rebarbas críticas são aquelas formadas na saída dos furos. A localização das rebarbas, ou seja, se estas se encontravam na chapa superior ou na chapa inferior, não apresentou correlação significativa com a altura da rebarba para a maioria dos casos. Apesar disso, graficamente foi possível notar que as rebarbas geradas na entrada da chapa inferior foram maiores que as geradas na entrada da chapa superior.

A geometria das ferramentas apresentou correlação significativa com a altura das rebarbas geradas. Isso permite concluir uma série de observações feitas na análise.

A broca EMB apresentou os menores valores de rebarba na entrada dos furos. Além disso, esta broca foi a que gerou menores rebarbas na interface entre as chapas. No entanto, ao se avaliar as rebarbas geradas na saída da chapa inferior as rebarbas foram demasiadamente elevadas. A presença de rebarbas elevadas na saída da chapa inferior e ausência das mesmas na saída da chapa superior é um bom indicativo de que a chapa inferior atuou como *backplate* para a chapa superior. Materiais de suporte (*backplate*) impedem que a rebarba cresça na saída dos furos, o

que foi eficaz na usinagem com a broca EMB. Para um material de suporte evitar o crescimento de rebarbas, este deve estar justaposto ao material usinado, sem permitir o surgimento de espaçamento entre os dois. Observando-se os resultados de força e flexão impostas sobre as chapas durante a furação com a broca EMB, nota-se que estas foram bem inferiores às geradas pelas outras brocas. Assim, o espaçamento entre as chapas foi menor e o material de suporte (chapa inferior) foi capaz de reduzir a formação de rebarbas. Apesar desta broca gerar altos valores de rebarba na saída da chapa inferior, que não é a situação ideal, na região crítica de interface a formação de rebarbas foi reduzida.

A utilização de brocas com ponta d_p nula não foi adequada para reduzir a formação de rebarbas. Principalmente na entrada das chapas, as rebarbas formadas por estas brocas eram elevadas. Na interface entre as chapas, que é uma região crítica na qual não podem existir rebarbas elevadas, a função de *backplate* da chapa inferior não ocorreu, pois esta não se encontrava justaposta à chapa superior devido a uma elevada flexão da chapa inferior. A ausência do material de suporte apoiando o material usinado fez com que as rebarbas fossem maiores. O tipo de rebarba “chapéu” formada pela broca na saída da chapa superior apresentava espessura elevada se comparada àquelas formadas pelas outras brocas. Essa espessura elevada retardou o corte da chapa inferior, sendo esta deformada com o avanço da ferramenta até que o “chapéu” aderido à ponta da ferramenta fosse eliminado. Além disso, durante o processo de eliminação deste “chapéu”, aparentemente este foi esmagado, escoando lateralmente e se mantendo aderido à saída do furo.

As brocas com ponta d_p positiva, geraram menores rebarbas se comparadas às brocas com d_p nula, o que ficou evidente ao se avaliar as rebarbas da entrada dos furos. Em princípio, a ponta de centragem avançada em relação às quinças, foi capaz de guiar a broca no início da furação evitando uma oscilação da mesma. Supõe-se que ao se utilizar a broca d_p nula, a falta de centragem no início da furação gerou rebarbas maiores ao longo da borda do furo. Na interface entre as chapas, as brocas com ponta d_p positiva apresentaram menores valores de rebarba na entrada da chapa inferior, se comparadas às brocas d_p nula. No entanto, na saída da chapa superior não houve uma diferença muito clara entre os dois tipos de broca. A broca 5, por sua vez, apresentou os menores valores de rebarba na interface, tanto na entrada quanto na saída das chapas, sendo pouco maiores que as geradas pela broca EMB. As deflexões causadas pelas brocas d_p positiva foram menores que aquelas causadas pelas d_p nula o que pode ser devido à espessura menor do “chapéu” formado entre as chapas e que é eliminado rapidamente.

A variação dos ângulos de hélice utilizados apresentou resultados coerentes com o esperado teoricamente. Como relatado anteriormente, ângulos de hélice estão diretamente relacionados aos ângulos de saída das brocas helicoidais. A elevação do ângulo de saída tende a reduzir as forças de avanço e os momentos torçores uma vez que o ângulo de cisalhamento é elevado, reduzindo o fator de recalque e conseqüente a deformação durante a formação do cavaco. Nos testes realizados, as forças de avanço foram reduzidas para uma elevação do ângulo de hélice. Com isso, para a usinagem de chapas finas de alumínio ALCLAD 2024 os menores esforços foram possíveis com as ferramentas de maiores ângulos de hélice.

Entre as brocas desenvolvidas, aquela que atende melhor os requisitos de altura de rebarba, esforços e flexão das chapas, é a broca 5, que possui ponta d_p positiva e maior ângulo de hélice. As forças e deflexões produzidas na usinagem com esta broca tiveram valores bem próximos aos gerados com a broca EMB. As rebarbas geradas pela broca 5 na interface entre as chapas apresentaram os valores mais próximos aos da broca EMB. A principal vantagem da broca 5 em relação à broca EMB se encontra na baixa rebarba gerada na saída da chapa inferior. Em um processo real, seria necessária uma etapa de rebarbação da chapa inferior quando se utiliza a broca EMB, enquanto que para a broca 5 esta etapa dispendiosa seria eliminada. Os valores de altura de rebarba gerados na interface são aceitáveis para a broca EMB e para a broca 5, enquanto os valores gerados pelas outras brocas não foram satisfatórios. No entanto os valores de força, flexão e altura de rebarba gerados pela broca 5 devem ser reduzidos a fim de serem inferiores aos obtidos pela broca EMB. Isto facilitaria a furação automatizada com o robô e garantiria as especificações exigidas pela empresa para o novo processo automatizado. Apesar de alguns autores [8] afirmarem que para materiais aeronáuticos rebarbas entre 100 e 150 μm são aceitáveis, o processo de automação da empresa parceira requer que as brocas gerem valores menores.

5.2 Sugestões para Próximos Trabalhos

Como este trabalho está inserido em um projeto de maiores proporções, onde um *end-effector* acoplado a um robô antropomórfico deve realizar as operações de furação, rebitagem, aplicação de selantes e

inspeção dos furos, vários trabalhos devem ser desenvolvidos tanto na parte de ferramentas quanto de processos de furação.

Para isso sugere-se que as mesmas furações sejam realizadas nas chapas sobrepostas com a presença do selante. Desta forma, o comportamento da furação do pacote alumínio/selante/alumínio poderia ser avaliado. Os tipos de selante na interface podem ainda ser variados a fim de se melhorar as propriedades de adesão, permitindo que as chapas se mantenham unidas durante a furação mesmo para altos valores de avanço da ferramenta.

É interessante ainda avaliar a resposta da formação das rebarbas e da flexão das chapas quando são furadas chapas curvas (situação real do processo de emenda de fuselagens).

É válida ainda a realização de testes de vida das ferramentas especiais com ponta de centragem, para determinar se o seu tempo de vida compensa os seus benefícios gerados.

Outro aspecto interessante de se avaliar é a utilização de revestimentos para a ferramenta que podem prolongar a vida desta e principalmente permitir altas velocidades de corte.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ÁVILA, M. C.; GRDNER, J. D.; REICH-WEISSER, C.; VIJAYA-RAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Strategies for Burr Minimization and Cleanability in Aerospace and Automotive Manufacturing. *SAE Transactions Journal of Aerospace*, Berkeley, v. 114, n. 1, p. 1073-1082, jan. 2006.
- [2] EGUTI, C. C. A.; TRABASSO, L. G.; GOMES, J. O. An Experimental Orbital Drilling Device for Automating the Drill Process of Aeronautical Structures, [São José dos Campos], [2008?].
- [3] KIHLMAN, H. Affordable Automation for Airframe Assembly – Development of Key Enabling Technologies. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade de Linköping, Linköping, Suécia, 2005, p. 286.
- [4] IOVENTTI, P. G.; MUTAPCIC, E.; NAGARAJAH, C. R. Positioning and Orienting a Drill Axis on a Curved Surface. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Victoria, v. 17, n. 7, p. 484-488, nov. 2001.
- [5] TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. Handbook of Aluminum: Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 736 p.
- [6] CHOI, J.; MIN, S.; DORNFELD, D. Finite Element Modeling of Burr Formation in Drilling of a Multi-layered Material. *Consortium on Deburring and Edge Finishing*, Berkeley, maio 2004.
- [7] CHOI, J.; MIN, S.; DORNFELD, D. A.; ALAM, M. TZONG, T. Investigation of the Interlayer Burrs by Drilling of Multi-layered Materials. *Proceedings for the 6th CIRP Workshop on Modeling of Machining*, 19-20/05/2003 Hamilton, ONT, Canadá.
- [8] PEÑA, B.; ARAMENDI, G.; RIVERO, A.; LACALLE L. N. L. Monitoring of Drilling for Burr Detection Using Spindle Torque. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Bilbao, v. 45, n. 14, p. 1614-1621, nov. 2005.

- [9] CHOI, J.; MIN, S.; DORNFELD, D.; ALAM, M.; TZONG, T. Modeling of Inter-layer Gap Formation in Drilling of a Multi-layered Material. *Proceedings for the 6th CIRP Workshop on Modeling of Machining*, 19-20/05/2003 Hamilton, ONT, Canadá
- [10] MIN, S.; DORNFELD, D.; NAKAO, Y. Influence of Exit Surface Angle on Drilling Burr Formation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Berkeley, v. 125, n. 4, p. 637-644, nov. 2003.
- [11] SILVA, J. D.; SARAMAGO, S. F. P.; MACHADO, A. R. Optimization of the Cutting Conditions (v_c , f_z e doc) for Burr Minimization in Face Milling of Mould Steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*. Uberlândia, v. 31, n. 2, p. 151-160, jun. 2009.
- [12] KO, S. L.; DORNFELD, D. A. A Study on Burr Formation Mechanism. *Journal of Engineering, Materials and Technology*, Berkeley, v. 113, n. 1, p. 75-87, jan. 1991.
- [13] GILLESPIE, L. K.; BLOTTER, P. T. The Formation and Properties of Machining Burrs. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Kansas, v. 1, n. 98, p. 66-74, fev. 1976.
- [14] CHERN, G. L. Study on Mechanisms of Burr Formation and Edge Breakout Near the Exit of Orthogonal Cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, Taiwan, v. 176, n. 1, p. 152-157, jun. 2006.
- [15] GILLESPIE, L. Deburring and Edge Finishing Handbook. 1. ed. Kansas City: American Society of Mechanical Engineers, 2000. 416 p.
- [16] SILVA, L. C. de; MELO, A. C. A. de; MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. de; SOUZA JR, A. M. Application of Factorial Design for Studying the Burr Behavior During Face Milling of Motor Engine Blocks. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 179, n. 1, p. 154-160, out. 2006.
- [17] NAKAYAMA, K.; ARAI, M. Burr Formation in Metal Cutting. *Annals of the CIRP*, v. 36, n. 1, p. 33-36, fev. 1987.

- [18] CHERN, G. L. Experimental Observation and Analysis of Burr Formation Mechanisms in Face Milling of Aluminum Alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Taiwan, v. 46, n. 12, p. 1517–1525, out. 2005.
- [19] CHU, C.; DORNFELD, D. Geometric Approaches for Reducing Burr Formation in Planar Milling by Avoiding Tool Exits. *Journal of Manufacturing Processes*, Berkeley, v. 7, n. 2, p. 182-195, set. 2005.
- [20] KO, S.; DORNFELD, D. A. Burr Formation and Fracture in Oblique Cutting. *Journal of Material Processing Technology*, Berkely, v. 62, n. 1, p. 24-36, nov. 1994.
- [21] OLVERA, O.; BARROW, G. An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Manchester, v. 36, n. 9, p. 1005-1020, set. 1996.
- [22] KIM, J.; DORNFELD, D. Development of an Analytical Model for Drilling Burr Formation in Ductile Materials. *ASME Transaction Journal of Engineering Materials and Technology*, Berkeley, v. 124, n. 2, p. 192-198, jan. 2002.
- [23] HEISEL, U.; LUIK, M.; EISSELER, R.; SCHAAL, M. Prediction of Parameters for the Burr Dimensions in Short-Hole Drilling. *CIRP ANNALS – Manufacturing Technology*, Stuttgart, v. 54, n. 1, p. 79-82, jun. 2007.
- [24] DORNFELD, D.; LEE, D. E. Precision Manufacturing. 1. ed. Berkeley: Springer, 2008. 771 p.
- [25] NARIGUDDE, M. N. Ann Model to Predict Burr Height and Thickness. Tese (Mestrado em Engenharia Industrial e de Manufatura) Wichta State University, Wichta, EUA, 2003, p. 92.
- [26] NARAYANASWAMI, R.; DORNFELD, D. A. Design and Process Planning Strategies for Burr Minimization and Deburring. *NAMRC: North American Manufacturing Research Conference*, Berkeley, v. 22, n. 1, p.313–322, jan. 1994.

- [27] AURICH, J. C.; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P. J.; FRANKE V.; LEITZ, L.; MIN, S. Burrs-analysis, Control and Removal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 58, n. 1, p. 519–542, out. 2009.
- [28] ACRESCENTAR KIM Investigation on the Geometric Characteristics of Drilling Burr in Stainless Steel [Artigo] // CODEF/LMA. - 1999. - pp. 40-42.
- [29] AURICH, J. C. SpanSauber Untersuchung zur Beherrschung der Sauberkeit von Zerspanend Hergestellten Bauteilen. *Ergebnisworkshop, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation*, Technische Universität Kaiserslautern, 2006.
- [30] LEOPOLD, J.; SCHMIDT, G. Methods of Burr Measurement and Burr Detection. *VDI-Berichte*, v. 8, n. 5p. 223–229, 2004.
- [31] GARY, B.; SIMON, C. Burr Size Reduction in Drilling by Ultrasonic Assistance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Hamilton, v. 21, n. 4, p. 442–450, ago. 2005.
- [32] BALLOU, J. R.; JOSHI, S. S.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. Burr Formation in Drilling Intersecting Holes with Machinable Austempered Ductile Iron. *Journal of Manufacturing Processes*, Urbana, v. 1, n. 1, p. 35-46, set. 2007.
- [33] KO, S.; CHANG, J.; YANG, G. Burr Minimizing Scheme in Drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, Seoul, v. 140, n. 1, p. 237–242, jul. 2003.
- [34] KO, S. L.; KIM, W. S. Development of Effective Measurement Method for Burr Geometry. *Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture*, Seoul, v. 4, n. 220, p. 507–512, dez. 2006.
- [35] NAKAO, Y.; WATANABE, Y. Measurements and Evaluations of Drilling Burr Profile. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Journal of Engineering Manufacture*, Yokohama, v. 4, n. 220, p. 513–523, jun. 2006.

[36] CHERN, G. L.; LIANG, J. M. Study on Boring and Drilling with Vibration Cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Touliu, v. 47, n. 1, p. 133-140, jan. 2007.

[37] KÖNIG, W.; KLOCKE, W.. Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte I Tradução e Adaptação do Livro “Fertigungsverfahren Drehen, Bohren, Fraesen” [Tradução em fase de elaboração por WEINGAERTNER W. L. e SCHROETER R. B]. - Florianópolis : [s.n.], 2002.

[38] BORK, C. A. S. Otimização de Variáveis de Processo para a Furação do Aço Inoxidável Austenítico DIN 1.4541. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1995, p. 127.

[39] SMITH, G. T. Cutting Tool Technology. 1. ed. London: Springer-Verlag London Limited, 2008. 599 p.

[40] KÖNIG, W.; KLOCKE, W. Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren. 5. ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. 471p.

[41] CASTILLO, W. J. G. Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2005. p. 134.

[42] STEMMER C. E. Ferramentas de Corte II. 7. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 314 p.

[43] BOEIRA, A. M. G. Modelagem e Simulação das Forças na Furação com Brocas Helicoidais a Partir de Dados Obtidos no Torneamento de Segmentos Cilíndricos. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2010. p. 175.

[44] BOEIRA, A. M. G.; KUSTER, F. WEGENER, K.; KNOBLAUCH, R.; MARGOT, R.; SCHROETER, R. B. Descrição da Geometria de Brocas Helicoidais a Partir de Modelos Matemáticos Combinados a Métodos de Medição Tridimensional. COBEF2009, 14-17/4/2009, Belo Horizonte-MG, Brasi.

[45] SOARES FILHO, M. Estudo da Formação de Rebarbas no Processo de Furação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1995, f. 145.

[46] DORNFELD, D.; MIN, S.; KIM, J.; HEWSON, J. Burr Prevention and Minimization for the Aerospace Industry. *Society of Automotive Engineers*, Berkeley, v. 22, n. 2, p. 67-73, jun. 1998.

[47] BRAMBILLA, P. A. Burr Formation in Drilling of Aluminum Alloy [Artigo] // CODEF. - 1999.

[48] KO, S. L.; LEE, J. K. Analysis on Burr Formation in Drilling with new Concept Drill. *Journal of Materials Processing Technology*, Seoul, v. 113, n. 1, p. 392-398, maio 2001.

[49] XIA, R. S.; MAHDAVIAN, S. M. Experimental Studies of Step Drills and Establishment of Empirical Equations for the Drilling Process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Victoria, v. 45, n. 2, p. 235-240, fev. 2005.

[50] ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M.; DURÃO, L. M. Evaluation of Delamination Damages on Composite Plates using Techniques of Image Processing and Analysis and a Backpropagation Artificial Neural Network. *Journal of Composite Materials*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 5, p. 120-128, nov. 2009.

[51] DAVIM, J. P.; REIS, P.; ANTÓNIO, C. C. Drilling Fiber Reinforced Plastics (FRPs) Manufactured by Hand Lay-up: Influence of Matrix (Viopal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Journal of Materials Processing Technology*, Porto, v. 155, n. 4, p.1828-1833, nov, 2004.

[52] ALBUQUERQUE, V. H. C. Evaluation of Delamination Damage on Composite Plates using an Artificial Neural Network for the Radiographic Image Analysis. *EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization*, 1-5/5/2008, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

[53] DAVIM, J. P.; REIS, P.; ANTÓNIO, C. C. Experimental Study of Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) Manufactured by Hand

Lay-up. *Composites Science and Technology*, Porto, v. 64, n. 2, p. 289-297, fev. 2004.

[54] MARQUES, A. T.; DURÃO, L. M.; MAGALHÃES, A. G.; SILVA, J. F.; TAVARES, J. M. R. S. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates: Evaluation of a Special Step Drill. *Composites Science and Technology*, Porto, v. 69, n. 14, p. 2376-2382, nov. 2009.

[55] HEWSON, J.; DORNFELD, D. A. Exit Burr Size and Shape in Backplate Assisted Drilling of Ti-6Al-4V. *Consortium on Deburring and Edge Finishing*. Berkeley, [Artigo técnico]. 1998.

[56] MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 699 p.

[57] DEAN, A.; VOSS, D. Design and Analysis of Experiments. 1. ed. New York: Springer Verlag, 1999. 740 p.

[58] TRIOLA, M. F. Introdução à Estatística. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999, 410 p.

[59] LAUDERBAUGH, L. K. Analysis of the Effects of Process Parameters on Exit Burrs in Drilling Using a Combined Simulation and Experimental Approach. *Journal of Materials Processing Technology*, Colorado, v. 209, n. 1, p. 1909-1919, fev. 2009.

[60] BASTOS, C. M. Modelagem e Simulação do Processo de Torno-Brochamento de Virabrequins. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2005, p. 120.

[61] GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; ACHYUTHA, B. T.; SIDESWARAPPA, B. Taguchi Optimization in Drilling of AISI 316L Stainless Steel to Minimize Burr Size Using Multi-performance Objective Based on Membership Function. *Journal of Materials Processing Technology*, Karnataka, v. 202, n. 3, p. 374-379, jun. 2008.

[62] STEIN, J. M.; DORNFELD, D. A. Burr Formation in Drilling Miniature Holes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Berkeley, v. 46, n. 1, p. 63-66, jul. 1997.

[63] ANDRADE, C. L. F. Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro de Canais Retos Revestidas com TiN, TiAlN. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2005, p.154.

[64] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.

[65] TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal Cutting. 4. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000, 446 p.

[66] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Metais. 6. ed. Campinas: Artliber, 2008, 262 p.

[67] REICH-WEISER, C.; DORNFELD, D. A. Drilling Burr Control Chart: Adding a Material Property Axis. *Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability*, UC Berkeley, jul. 2005.

[68] KIM, J., HEWSON, J., DORNFELD, D.A. Preliminary Experiment of Drilling Burr Formation on Titanium Alloy. *Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability*, UC Berkeley, Technical Paper. (1998)

[69] KIM, D. W.; LEE, Y. S.; OH, Y. T.; CHU, C. N. Prevention of Exit Burr in Microdrilling of Metal Foils by Using a Cyanoacrylate Adhesive. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, London, v. 27, n. 1, p. 1071-1076, abril, 2005.

[70] AUDY, J. A study of Computer-assisted Analysis of Effects of Drill Geometry and Surface Coating on Forces and Power in Drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, Bunbury, v. 204, n. 3, p. 130-138, ago. 2008.

[71] WANG, J.; ZHANG, Q. A Study of High-performance Plane Rake Faced Twist Drills: Part II: Predictive Force Models. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Sidney, v. 48, n. 11, p. 1286-1295, set. 2008.

APÊNDICES

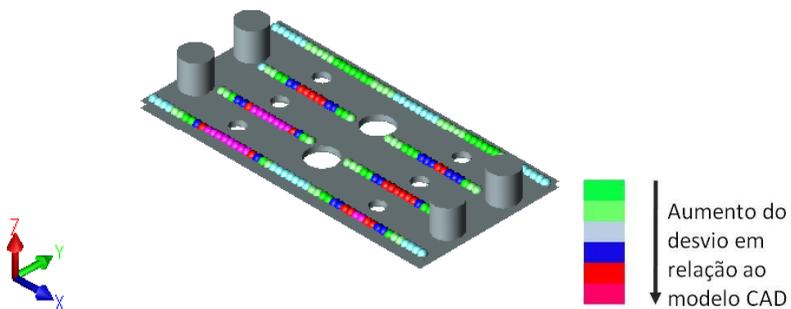
APÊNDICE I- Dispositivo de Fixação dos Corpos de Prova

APÊNDICE II- Medição da Flexão das Chapas

APÊNDICE III- Arranjo Fatorial dos Experimentos

APÊNDICE II- Medição da Flexão das Chapas

A Figura a seguir representa o modelo CAD exportado para o programa Mcosmos. Cada ponto colorido representa uma medição feita, sendo a graduação das cores indicativa do afastamento entre o modelo CAD e a superfície medida.



APENDICE III- Arranjo Fatorial dos Experimentos

Broca	Helice	dp	Vc	Avanço	Ordem dos Ensaio	Broca	Helice	dp	Vc	Avanço	Ordem dos Ensaio
1	1	0	125	0,03	1	4	2	1	175	0,07	40
1	1	0	125	0,07	36	4	2	1	175	0,1	18
1	1	0	125	0,1	15	5	3	0	125	0,03	59
1	1	0	150	0,03	13	5	3	0	125	0,07	27
1	1	0	150	0,07	31	5	3	0	125	0,1	4
1	1	0	150	0,1	21	5	3	0	150	0,03	46
1	1	0	175	0,03	38	5	3	0	150	0,07	45
1	1	0	175	0,07	16	5	3	0	150	0,1	52
1	1	0	175	0,1	32	5	3	0	175	0,03	11
2	1	1	125	0,03	26	5	3	0	175	0,07	51
2	1	1	125	0,07	37	5	3	0	175	0,1	42
2	1	1	125	0,1	44	6	3	1	125	0,03	25
2	1	1	150	0,03	20	6	3	1	125	0,07	54
2	1	1	150	0,07	48	6	3	1	125	0,1	56
2	1	1	150	0,1	12	6	3	1	150	0,03	30
2	1	1	175	0,03	35	6	3	1	150	0,07	2
2	1	1	175	0,07	7	6	3	1	150	0,1	28
2	1	1	175	0,1	23	6	3	1	175	0,03	6
3	2	0	125	0,03	61	6	3	1	175	0,07	33
3	2	0	125	0,07	58	6	3	1	175	0,1	62
3	2	0	125	0,1	24	7	3	3	125	0,03	43
3	2	0	150	0,03	14	7	3	3	125	0,07	8
3	2	0	150	0,07	9	7	3	3	125	0,1	55
3	2	0	150	0,1	10	7	3	3	150	0,03	63
3	2	0	175	0,03	19	7	3	3	150	0,07	41
3	2	0	175	0,07	49	7	3	3	150	0,1	47
3	2	0	175	0,1	22	7	3	3	175	0,03	3
4	2	1	125	0,03	5	7	3	3	175	0,07	53
4	2	1	125	0,07	34	7	3	3	175	0,1	50
4	2	1	125	0,1	17						
4	2	1	150	0,03	60						
4	2	1	150	0,07	39						
4	2	1	150	0,1	29						
4	2	1	175	0,03	57						

ANEXOS

ANEXO I - Meio lubri-refrigerante

ANEXO II – Máquina-ferramenta

ANEXO III – Sistema de Medição de Forças

ANEXO IV- Máquina de Medir por Coordenadas

ANEXO V- *Probe* de Medição da MMC

ANEXO I - Meio Lubri-refrigerante



Descrição de Produtos

Castrol Superedge 6552

Fluido semi-sintético de alta performance

Aplicação

Superedge 6552 é recomendado para uso em sistemas centralizados ou reservatórios individuais de máquinas operatrizes de comando numérico e convencionais, de todos os tipos de metais.

	Ferro Fundido	Aço Carbono	Aço INOX	Alumínio e Ligas	Metais Amarelos
Retificação	✓✓	✓✓	✓	✓	✓
Fresamento, torneamento (usinagem geral)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓
Furação	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓
Roasqueamento, Alargamento	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓
Brochamento	✓✓	✓✓	✓		✓

Características típicas

	Unidade	Método	Valor
Produto Concentrado			
Aparência		Visual	Líquido âmbar
Densidade a 20°C	g/cm3	ASTM D 4052	1,020
Emulsão			
Aparência		Visual	Leitosa
pH (5%)		MCB 02	9,0
Fator de correção		MCB 62	1,2

Os dados fornecidos são baseados nas médias dos resultados de testes. Pequenas variações podem ocorrer a cada caso.

Concentrações recomendadas

Operações	Alumínio e Ligas	Metais amarelos	Aços e ligas	Ferro Fundido
Usinagem em geral	5 - 8 %	5 - 8 %	5 - 8 %	5 - 8 %
Retificação	6 - 7 %	4 - 5 %	5 - 6 %	5 - 6 %
Rosqueamento e alargamento	6 - 12 %	6 - 12 %	6 - 12 %	6 - 12 %
Geração de engrenagens	6 - 8 %	6 - 8 %	7 - 12 %	5 - 8 %
Brochamento	7 - 10 %	7 - 10 %	8 - 15 %	6 - 10 %
Retífica Creep Feed	4 - 6 %	4 - 6 %	---	5 - 8 %
Furação profunda	7 - 10 %	6 - 8 %	7 - 12 %	5 - 8 %
Centro de usinagem	5 - 8 %	5 - 8 %	6 - 8 %	5 - 7 %

No caso de sistemas centralizados a concentração mínima recomendada é de 8%

ANEXO II – Máquina-ferramenta



Foto Ilustrativa
Equipado com opcionais

Romi D 800AP

Especificações técnicas

Cabeçote Vertical		
Cone do eixo-árvore	ISO	40
Faixa de velocidades (versão 7.500 rpm)	rpm	7 a 7.500
Faixa de velocidades (versão 10.000 rpm)	rpm	10 a 10.000
Faixa de velocidades (versão 12.000 rpm)	rpm	12 a 12.000
Avanços		
Avanço rápido (eixos X / Y / Z)	m / min	40
Avanço de corte programável	m / min	20
Cursos		
Curso da mesa superior (eixo X)	mm	800
Curso da mesa inferior (eixo Y)	mm	530
Curso do cabeçote (eixo Z)	mm	580
Distância entre nariz do eixo-árvore e mesa	mm	115 a 695
Mesa		
Superfície da mesa	mm	914 x 500
Largura das ranhuras x distância	mm	18 x 89
Número de ranhuras (rasgos T)	-	5
Peso admissível (uniformemente distribuído)	kg	900
Trocaador de ferramentas com braço automático		
Capacidade de ferramentas	un	30
Diâmetro máximo da ferramenta	mm	80
Diâmetro máximo da ferramenta quando os alojamentos adjacentes estão vazios	mm	150
Comprimento máximo da ferramenta	mm	300
Mandril da ferramenta	tipo	BT / CAT / DIN
Peso máximo da ferramenta	kg	8
Peso máximo admissível no magazine	kg	102
Tempo de troca ferramenta / ferramenta (cavaco a cavaco) (*)	s	3,9
Potência instalada		
Motor principal ca	cv / kW	23,6 / 17,3 (56 - 60% 10 min)
Potência total instalada	kVA	30 (10.000 rpm) 35 (12.000 rpm)
Dimensões e peso (aproximado)		
Altura	mm	2.700
Área ocupada (frente x lateral) (**)	mm	2.600 x 2.680
Peso líquido	kg	5.500

(*) Conforme norma VDI 2852-1 e ISO 230-2

(**) Sem transportador de cavacos

Equipamentos standard

- CNC Siemens Sinumerik 828D
- Cobertura completa contra cavacos e respingos
- Instalação elétrica para alimentação em 380 Vca, 50 / 60 Hz
- Jogo de parafusos e porcas de nivelamento
- Jogo de chaves para operação da máquina
- Jogo de manuais de instruções
- Luminárias fluorescentes
- Painel de operação auxiliar manual (*HandWheel*) com funções de manivela e jog para eixos
- Pintura *standard*: esmalte *Epoxi* texturizado azul Munsell 10B-3/4 e esmalte *Epoxi* texturizado cinza claro RAL 7035
- Porta principal com trava elétrica de segurança
- Sistema de lubrificação centralizada automática
- Sistema pneumático para limpeza do cone do eixo-árvore e destreamento da ferramenta
- Sistema de refrigeração de corte com pressão de 2 bar, vazão 20 l/m, tanque removível com volume de 300 litros
- Trocaador de ferramentas com braço automático com capacidade para 30 ferramentas, BT-40

Equipamentos opcionais

- Adaptação hidráulica para dispositivo de fixação (pressão máx. 50 bar)
 - Ar condicionado para painel elétrico
 - Auto desligamento da máquina após fim de turno (*auto power off*)
 - Autotransformador para rede de 200 - 250 Vca, 360 - 420 Vca ou 440 - 480 Vca
 - Bomba de alta pressão para refrigeração pelo centro do eixo-árvore de 7 bar, 15 bar (A), ou 50 bar (A) (B)
 - Cabeçote preparado para refrigeração pelo centro do eixo-árvore (não inclui bomba de alta pressão)
 - Botão de ciclo *start* fora do IHM
 - Filtro para sistema de exaustão de névoas
 - Interface genérica com 6 códigos M
 - Interface para diagnóstico remoto
 - Interface para mesa giratória MGR 230
 - Lâmpada indicadora de status (3 cores)
 - Mesa giratória MGR 230 (C)
 - Mesa giratória MGR 230 com amplificador de pressão booster (C)
 - Cabeçote móvel manual para mesa giratória MGR 230
 - Cabeçote móvel pneumático de acionamento manual
 - Flange para placa Ø 200 mm
 - Placa universal Ø 200 mm, com jogo de 3 castanhas duras
 - Adaptador CM 3 para mesa giratória MGR 230
 - Pintura especial conforme padrão Munsell ou RAL
 - Pistola de lavagem (*wash gun*)
 - Sistema de esatúto de névoas
 - Porta automática com batente de segurança
 - Separador de óleo / refrigerante (oil *skimmer*)
 - Sistema de filtragem do refrigerante de corte (paper filtrante)
 - Sistema de limpeza das proteções
 - Sistema de limpeza pneumática durante usinagem
 - Sistema de medição / inspeção de peças com palpador OMP 40, sensor óptico OMI, ponta PS3-1C
 - Sistema de refrigeração da carcaça do cabeçote (DI)
 - Sistema para *preset* de ferramentas com sensor TS-ZTR
 - Transdutor linear de posição (régua óptica) para os eixos X, Y e Z
 - Transportador de cavacos helicoidal (TCH)
 - Transportador de cavacos de esteira articulada metálica (TCE)
 - Transportador de cavacos de esteira de arnaste (TCA)
 - Transportador de cavacos de esteira magnética (TOM)
 - Trocaador de ferramentas com braço automático com capacidade para 30 ferramentas CAT 40 ou DIN 40
 - Trocaador manual de *pallets*
- (A) Requer cabeçote preparado para refrigeração do eixo-árvore (opcional)
(B) Requer sistema de filtragem de fluido refrigerante de corte (opcional)
(C) Requer interface para mesa giratória (opcional)
(D) Não se aplica a máquinas com cabeçote de 12.000 rpm

ANEXO III – Sistema de Medição de Forças

Technical Data			9265B	9265B
Type			+ 9411B	+9443B
Range	F_x, F_y	kN	-15 ... 15 ¹⁾	-15 ... 15 ¹⁾
	F_z	kN	0 ... 30 ²⁾	-10 ... 30 ¹⁾
Calibrated partial range	F_x, F_y	kN	0 ... 1,5	0 ... 1,5
	F_z	kN	0 ... 3	0 ... 3
Overload	F_x, F_y	kN	-20/20	-20/20
	F_z	kN	-12/40	-12/40
Threshold		N	<0,01	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈-8	≈-8
	F_z	pC/N	≈-3,7	≈-3,7
Linearity, all ranges		% FSO	≤±0,5	≤±0,5
Hysteresis, all ranges		% FSO	≤0,5	≤0,5
Cross talk		%	≤±2	≤±2 ³⁾
Rigidity	c_x, c_y	kN/μm	≈0,8	≈1
	c_z	kN/μm	≈2	≈2
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n(x, y)$	kHz	≈1,5	1,7
	$f_n(z)$	kHz	≈2,5	2,7
Operating temp. range		°C	0 ... 70	0 ... 70
Capacitance (of channel)		pF	≈500	≈500
Insulation resistance (20 °C)		Ω	>10 ¹³	>10 ¹³
Ground insulation		Ω	>10 ⁸	>10 ⁸
Protection class EN60529		–	IP67 ⁴⁾	IP67 ⁴⁾
Weight		kg	20	19,8
Clamping area		mm	–	135x203
Connection			Fischer flange, 9-pole neg.	

¹⁾ Application of force inside and max. 100 mm above top plate area.

²⁾ Range for tuning, application of force at point A

³⁾ Application of force inside and max. 50 mm above top plate area

⁴⁾ With connecting cable Type 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

Dimensions with Mounted Clamping Plate
(Milling, Grinding)

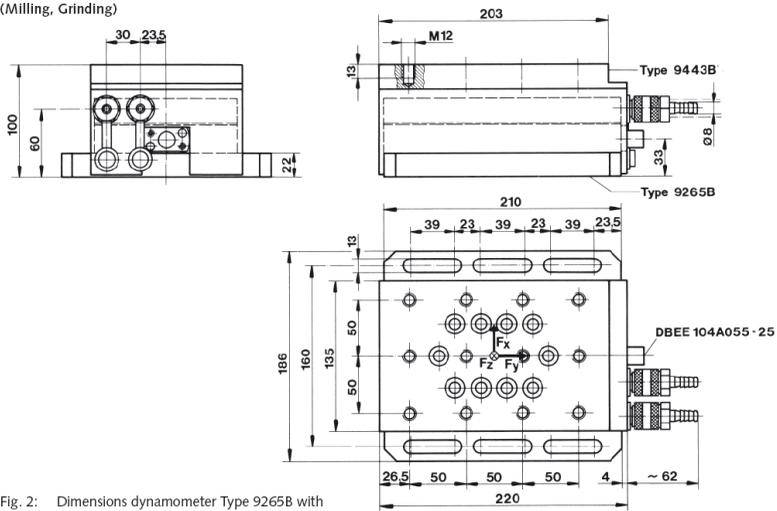


Fig. 2: Dimensions dynamometer Type 9265B with mounted clamping plate Type 9443B

ANEXO IV- Máquina de Medir por Coordenadas

Model No	CRT-Apex C7106	CRT-Apex C9106	CRT-Apex C9166
Image			
X-axis	0-27.75in 0-705mm	0-35.62in 0-905mm	0-35.62in 0-905mm
Y-axis	0-39.56in 0-1005mm	0-39.56in 0-1005mm	0-63.18in 0-1605mm
Z-axis	0-23.81in 0-605mm	0-23.81in 0-605mm	0-23.81in 0-605mm
Resolution	.000004in 0.0001mm	.000004in 0.0001mm	.000004in 0.0001mm
Accuracy	MPEE=(1.7+3L/1000) μ m**, (1.7+4L/1000) μ m*** MPEP=1.7 μ m MPETHP=2.3 μ m MPTTHP 110s	MPEE=(1.7+3L/1000) μ m**, (1.7+4L/1000) μ m*** MPEP=1.7 μ m MPETHP=2.3 μ m MPTTHP 110s	MPEE=(1.7+3L/1000) μ m**, (1.7+4L/1000) μ m*** MPEP=1.7 μ m MPETHP=2.3 μ m MPTTHP 110s
Material	Granite	Granite	Granite
Work Table Size	34.64x67.71in 880x1720mm	42.51x67.71in 1080x1720mm	42.51x91.33in 1080x2320mm
Tapped Insert	M8x1.25mm	M8x1.25mm	M8x1.25mm
Workpiece Hght	31.50in 800mm	31.49in 800mm	31.49in 800mm
Workpiece load	2204lbs 1000kg	2645lbs 1200kg	3306lbs 1500kg
Mass(main unit)	4301lbs 1951kg	4918lbs 2231kg	6322lbs 2868kg
Dimensions	57.87x76.77x107.48in 1470x1950x2730mm	65.74x76.77x107.48in 1670x1950x2730mm	65.74x105.9x107.48in 1670x2690x2730mm
Temp			

ANEXO V- Probe de Medição da MMC

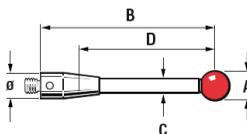
Ball material properties

Stylus type	Material	Grade	Deviation from spherical form	Structure	Composition	Purity	Density	Hardness	Compression strength	Bending strength	Fracture toughness K _{1c}
			(μm)	-	(wt%)	(%)	(g/cm^3)	HV	(MPa)	(MPa)	($\text{MNm}^{3/2}$)
AL ₂ O ₃ Ruby balls	Synthetic ruby monocrystalline	Grade 5*	0.13	mono	99% AL ₂ O ₃	99.90	3.90	1800	2100	390	1
Silicon nitride balls	Hard pressed Si ₃ N ₄	Grade 5*	0.13	poly	Si ₃ N ₄	90	3.0-3.2	1600	3000	1000	6
Zirconia oxide balls	Sintered ZrO ₂	Grade 5*	0.13	poly	ZrO ₂	90-95	6.05	1200	2000	700-1100	10
Alumina hollow balls	White ceramic sintered alumina AL ₂ O ₃	-	1	poly	AL ₂ O ₃	98.80	3.8-3.9	1570	-	-	-
Silver steel discs	Silver steel	-	1	-	-	-	8	450	-	-	-
Silver steel simple cylinder	Silver steel	-	Roundness 4 μm	-	-	-	8	200	-	-	-
Ruby ball ended cylinder	Synthetic ruby	Ball: Grade 5*	Ball deviation from spherical form : 0.13 Concentricity: Ball/cylinder 4 μm	mono	99% AL ₂ O ₃	99.90	3.90	1800	2100	390	1
Tungsten carbide ball ended cylinder	Tungsten carbide	-	+ 20 μm end radius	-	92-93.5% WC 6.5-8% CO	14.8	14.95	1550	6000	-	-
Silver steel simple pointer	Silver steel	-	Cone angle 30°	-	-	-	8	300	-	-	-
Tungsten carbide radius end pointer	Tungsten carbide	-	Cone angle 30°	-	92-93.5% WC 6.5-8% CO	99.90	15	1550	6000	-	-
Aluminium hollow balls	Al. alloy 6082-T6	-	30 μm	-	95.2-98.3% AL	-	2.7	95	-	-	-

* Refers to DIN-5401, ISO 3290 and AFEMA 3290 ball grade standards.
* Grade 3 sphericity balls are available on request.

Extension material properties

Material	Coeff. of expansion @25°C
Stainless steel	$16 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Tungsten carbide	$5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
White ceramic sintered alumina	$8.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Carbon fibre	$-0.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Titanium	$9.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Ruby	$4.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Silicon nitride	$3.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Zirconia	$10.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$



- A** Ball diameter
- B** Overall length
- C** Stem diameter
- D** Effective working length
- \varnothing M2 = 3 mm
- \varnothing M3 = 4 mm
- \varnothing M4 = 7 mm
- \varnothing M5 = 10 mm