

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS SILVEIRA CAMPOS
RENAN PARIS CURCE

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE ARESTAS DE
CORTE NO DESGASTE DE BROCA CANHÃO PARA FURAÇÃO
PROFUNDA EM AÇO SAE 4144M ENDURECIDO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC 2 – N° de inscrição 16)

CURITIBA

2016

LUCAS SILVEIRA CAMPOS

RENAN PARIS CURCE

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE ARESTAS DE
CORTE NO DESGASTE DE BROCA CANHÃO PARA FURAÇÃO
PROFUNDA EM AÇO SAE 4144M ENDURECIDO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli

CURITIBA

2016

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE ARESTAS DE CORTE NO DESGASTE DE BROCA CANHÃO PARA FURAÇÃO PROFUNDA EM AÇO SAE 4144M ENDURECIDO”, realizada pelos alunos Lucas Silveira Campos e Renan Paris Curce, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli
UTFPR – DAMEC

Curitiba, 17 de novembro de 2016.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE ARESTAS DE CORTE NO DESGASTE DE BROCA CANHÃO PARA FURAÇÃO PROFUNDA EM AÇO SAE 4144M ENDURECIDO”, realizada pelos alunos Lucas Silveira Campos e Renan Paris Curce, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 – Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Milton Luiz Polli

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Aloísio José Schuitek

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Daniel Hioki

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 07 de Dezembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho àqueles que amamos e nos apoiaram incondicionalmente, ensinaram sabedoria, humildade e dedicação. Valores que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente àqueles que amamos, familiares e pessoas próximas, por apoiarem incondicionalmente, encorajando e contribuindo sempre.

Ao Professor Milton Luiz Polli por ter aceito o convite para orientar, por sua contribuição para desenvolvimento do projeto, a qual foi fundamental para construção e desenvolvimento do presente trabalho.

Nossa gratidão aos professores da banca avaliadora Daniel Hioki e Aloísio José Schuitek, primeiramente por terem aceito fazer parte da avaliação, pelas contribuições e ideias sugeridas, sempre muito relevantes e enriquecedoras.

Agrademos aos profissionais e doutorandos Srs. Marlon José Cardoso e Moisés Izaias de Santana, dos quais sem o apoio e direcionamento dados, não seria possível a realização deste trabalho.

Agradecemos à empresa Robert Bosch de Curitiba em geral, mais especificamente departamentos TEF11 e MSP21 e nas figuras dos Srs. Marcos Marocki, Joelcio Benvenuti, Taynan Caitano, Alesson Lopes, Elitu Cunico, Aparecido Santos, José Fernando, Irineu Gusso e demais colegas envolvidos no projeto por terem contribuído e autorizado a publicação deste projeto em parceria com a universidade.

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a todos os professores envolvidos durante nossa formação, em especial àqueles, que humilde e pacientemente nos transmitiram não somente aprendizados técnicos, mas também nos fizeram crescer como seres humanos. Nossa gratidão especial ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais, na figura do Sr. Alexandre José Gonçalves, por providenciar suporte essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

CAMPOS, Lucas S. CURCE, Renan P. Análise da influência da preparação de arestas de corte no desgaste de broca canhão para furação profunda em aço SAE 4144M endurecido. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

Métodos de preparação da aresta de corte de ferramentas têm sido cada vez mais desenvolvidos pela indústria devido aos benefícios proporcionados, principalmente no aumento de vida útil da ferramenta e consequente redução de custos. O domínio dessa técnica de preparação é de alta complexidade, tornando-a um processo com poucos dados científicos e mantido em níveis de segredo industrial. O presente trabalho analisa a viabilidade do emprego de brocas canhão preparadas através do processo automático *Drag Finishing* de arredondamento de arestas, no qual se utiliza uma máquina para a proteção das mesmas, em substituição ao processo manual e a ferramentas somente afiadas, utilizadas para furação profunda do aço SAE 4144M endurecido. Avalia-se a influência do método adotado na vida útil desempenhada pela ferramenta através da análise, via MEV e EDS, de desgastes e estado da aresta de corte da ferramenta. Nota-se que a preparação da aresta de modo automático torna o raio de arredondamento e consequentemente a forma geométrica da aresta mais regular quando comparado ao processo manual e às ferramentas somente afiadas. Com isso há um desgaste menor e mais uniforme, consequentemente aumenta a vida útil da ferramenta.

Palavras-chave: Broca canhão, Furação profunda, *Honing*, *Drag Finishing*, Afição, Aresta de corte, Raio de aresta.

ABSTRACT

CAMPOS, Lucas S. CURCE, Renan P. Analysis of the influence of cutting edge preparation in gun drill wear for deep drilling in forged and hardened steel AISI 4144M. Senior Final Project – Mechanical Engineering Undergraduate Major, Federal University of Technology Paraná, 2016.

Methods of cutting edge preparation have been increasingly developed by the industry due to the provided benefits, mainly expanding the tool's life and consequently reducing costs. The technique of these methods is highly complex, therefore there is few scientific data about it available, being kept in industrial secret levels. This paper evaluates the viability of using gun drills prepared through the automatic cutting edge rounding process of Drag Finishing, in which a machine is used for the edge preparation, replacing the manual process and also only sharpened tools which are used for deep drilling of SAE hardened steel 4144M. The influence of the methods on the tool life is evaluated by analyzing, via MEV and EDS, the wears on the tools and the cutting edge. It has been realized that automatic cutting edge preparation leads to a more uniform rounding radius and consequently geometric form, when compared to the manual process and only sharpened tools. Therefore, there is a smaller and more uniform wear, what increases the tool life.

Keywords: Gun grill, Deep hole drilling, Honing, Drag Finishing, Sharpening, Cutting edge, Edge radius.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imperfeições processo de furação	22
Figura 2 - Nomenclatura da broca canhão	24
Figura 3 - Dimensões da broca canhão	24
Figura 4 - Ângulos da broca canhão	25
Figura 5 – Exemplo de afiação de broca canhão	26
Figura 6 - Canais de refrigeração.....	27
Figura 7 - Formatos externos de brocas canhão.....	27
Figura 8 - Movimentos de corte e avanço na furação	30
Figura 9 - Forças atuantes na broca canhão.....	32
Figura 10 - Principais tipos de desgaste em uma broca canhão	34
Figura 11 - Aresta postiça de corte	35
Figura 12 - Desgaste de cratera.....	36
Figura 13 - Formas geométricas de preparação de arestas.....	37
Figura 14 - Caracterização da aresta de corte	38
Figura 15 - Arredondamento da aresta de corte.....	39
Figura 16 - Microgeometria da aresta de corte.....	40
Figura 17 - Arredondamento da aresta de corte em broca canhão	41
Figura 18 - Exemplo de ferramentas em um processo <i>Drag Finishing</i>	42
Figura 19 - Diferença no tempo de processo	43
Figura 20 - Direção de trabalho do abrasivo de acordo com o sentido de rotação ..	44
Figura 21 - Etapas do método experimental do projeto de pesquisa.	46
Figura 22 – Porta-injetor <i>Unit Pump</i>	47
Figura 23 – Desenho esquemático do corpo de prova.....	48
Figura 24 – Broca canhão utilizada no projeto	49

Figura 25 - Centro CNC Retco	51
Figura 26 – Equipamento <i>Drag Finishing</i> utilizado	52
Figura 27 - Exemplo de uso da máquina <i>Drag Finishing</i> com o abrasivo 1/300	53
Figura 28 – Afição da aresta transversal.....	54
Figura 29 - Equipamento para processo manual de arredondamento.	55
Figura 30 - Execução do processo de arredondamento manual.....	55
Figura 31 - Dispositivo para broca canhão.....	56
Figura 32 - Ferramenta montada no equipamento <i>Drag Finishing</i>	57
Figura 33 - Posicionamento da ferramenta para medição em rugosímetro.....	58
Figura 34 - Pontos de medição do arredondamento	58
Figura 35 - Exemplos de sobreposição de superfícies em furos de alta pressão. Ampliação de 100 e 500x.....	60
Figura 36 - Concentração de tensões devido à sobreposição de material.....	61
Figura 37 - Perfil da ferramenta afiada sem identificação do raio de arredondamento.	65
Figura 38 - Exemplo de medição de raio de arredondamento.....	66
Figura 39 - Comparação entre os estados das ferramentas pré-usinagem.	68
Figura 40 - Ferramentas pré-usinagem com ampliação de 350x.	69
Figura 41 – Ferramenta na iminência do colapso até usinagem de 250 peças.	70
Figura 42 - Ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças (3,7 m). Ampliação de 146x.....	72
Figura 43 - Ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças (3,7 m) - vista de topo. Ampliação de 146x.....	72
Figura 44 – Aresta de corte da ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças.....	73
Figura 45 - Ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 50 peças. Ampliação de 146x.....	74

Figura 46 - Aresta de corte da ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 50 peças.....	75
Figura 47 - Ferramenta com arredondamento automático de 15 minutos após usinagem de 50 peças. Ampliação de 146x.....	76
Figura 48 - Aresta de corte da ferramenta após arredondamento automático e usinagem de 50 peças	76
Figura 49 - Ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 250 peças - vista de topo. Ampliação de 146x.	78
Figura 50 - Desgaste em broca com arredondamento automático de 10 minutos (vista de topo). Ampliação de 146x.	79
Figura 51 - Desgaste em broca com arredondamento automático de 10 minutos (vista da superfície de saída) – Ampliação de 146x.....	79
Figura 52 – Análise do furo usinado com ferramenta após preparação automática de arestas.	80
Figura 53 - Ângulos de saída negativos gerados pelo arredondamento na aresta de corte.....	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Participação e tempos dos processos de furação.	20
Gráfico 2 - Influência dos parâmetros S_y e S_α na vida útil da ferramenta.....	40
Gráfico 3 - Geometria da ferramenta x número de peças para <i>overlapping</i>	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os aços SAE 4144M e 4140	33
Tabela 2 - Análise química do material do corpo de prova	47
Tabela 3 - Ferramenta de corte utilizada.....	50
Tabela 4 - Quantidade de ferramentas novas por etapa	62
Tabela 5 - Raios de arredondamento da aresta de corte	66
Tabela 6 - Raio de arredondamento da guia	67
Tabela 7 - Composição química da região da aresta de corte da ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças.....	73
Tabela 8 - Composição química da região da aresta de corte da ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 50 peças	75
Tabela 9 - Composição química da região da aresta de corte da ferramenta após arredondamento automático de 15 minutos e usinagem de 50 peças	77
Tabela 10 - Valores de KL para cada geometria.	80

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

α_1	Ângulo de folga normal da aresta externa	°
α_2	Ângulo de folga normal da aresta interna	°
α_3	Ângulo de folga secundário	°
κ_1	Ângulo de posição complementar da aresta externa	°
κ_2	Ângulo de posição complementar da aresta interna	°
ρ	Massa específica do material do cavaco	kg/m ³
c_1	Distância no eixo y da aresta de entrada em relação a centro de coordenadas da ferramenta	mm
c_2	Distância no eixo y da aresta de saída em relação a centro de coordenadas da ferramenta	mm
D	Diâmetro	mm
f	Avanço por rotação	mm/rev
F _c	Força de corte	N
F _f	Força de avanço	N
F _p	Força passiva	N
h	Espessura do cavaco	m
HRc	Unidade de dureza Rockwell na escala C	
HSS	High speed steel	
K _L	Distância entre o gume e início da aresta	mm
K _T	Profundidade da cratera	mm
L	Profundidade	mm
m _d	Distância no eixo x do ponto de furação em relação a centro de coordenadas da ferramenta	mm
MEV	Microscópio eletrônico de varredura	
n	Rotação	rev/min
P _f	Plano de trabalho convencional	
PPP	Proposta de projeto de pesquisa	
P _p	Plano passivo da ferramenta	
P _r	Plano de referência da ferramenta	

S α	Distância entre o vértice da aresta de corte e o ponto de tangencia do arredondamento da aresta nas superfícies de folga	mm
S γ	Distância entre o vértice da aresta de corte e o ponto de tangencia do arredondamento da aresta na superfície de saída	mm
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	
V _c	Velocidade de corte	m/min
V _e	Volume ocupado pelo cavaco	m ³
V _p	Volume do material do cavaco	m ³

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contexto do Tema	16
1.2	Caracterização do Problema	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivos Gerais	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	Justificativa	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Processo de furação	20
2.2	Furação profunda	22
2.3	Broca canhão	23
2.4	Materiais para fabricação de brocas	28
2.5	Revestimentos	28
2.6	Movimentos relativos durante a usinagem	29
2.7	Forças e momentos de corte	31
2.8	Usinabilidade	32
2.9	Aço SAE 4144M	32
2.10	Avarias e desgastes da ferramenta	33
2.11	Mecanismos de desgaste	34
2.12	Critério para fim da vida útil da ferramenta	36
2.13	Preparação das arestas de corte	36
2.14	Processo <i>Drag Finishing</i>	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Materiais e equipamentos	46
3.1.1	Corpo de prova	47
3.1.2	Ferramenta de corte	48
3.1.3	Máquina-ferramenta	50
3.1.4	Equipamento para preparação de aresta	51
3.2	Descrição da Metodologia	53
3.2.1	Preparação das ferramentas	53
3.2.2	Usinagem dos corpos de prova	62
3.2.3	Caracterização do desgaste	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Arredondamento antes da preparação de arestas	65
4.2	Estado após preparação de arestas	66
4.3	Especificação do critério de fim de vida	69
4.4	Estado da ferramenta após usinagem de 50 peças (3,7 m)	71
4.4.1	Ferramenta somente afiada	72
4.4.2	Ferramenta após arredondamento manual	74
4.4.3	Ferramenta após arredondamento automático de 15 minutos	76
4.5	Estado após usinagem de 250 peças (18,4 m)	78
4.5.1	Ferramenta após preparação de arestas manual	78
4.5.2	Ferramenta após arredondamento automático de 10 minutos	78
4.6	Análise da superfície usinada.	80
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	83

5.1	Conclusões	83
5.1.1	Quanto ao processo automático <i>Drag Finishing</i>	83
5.1.2	Quanto à influência do arredondamento	83
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – EXEMPLOS DE Relatórios obtidos por rugosímetro	91
	APÊNDICE B – Imagens obtidas com o MEV da aresta de corte da ferramenta sem arredondamento antes e depois da usinagem de 50 peças	92
	APÊNDICE C – Imagens obtidas com o MEV da aresta de corte da ferramenta com arredondamento manual antes e depois da usinagem de 50 peças	93
	APÊNDICE D – Imagens obtidas com o MEV da aresta de corte da ferramenta com arredondamento automático antes e depois da usinagem de 50 peças	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

A broca canhão é largamente utilizada, por exemplo na indústria automobilística, para realizar a furação profunda em peças de motores, injetores de combustível. Outra aplicação é na área de produtos biomédicos, como pinos inseridos no interior de ossos. Com isso, o tempo e custos envolvidos na usinagem desses processos apresentam grande potencial de ganhos ao otimizá-los.

Existem diversas oportunidades para melhorias no processo: estender a vida da ferramenta, obter melhor qualidade nos furos, aumentar a produtividade e consequentemente reduzir custos. Mudar o material da peça nem sempre é possível, visto que há especificações e requisitos de projeto que dificultam ou até mesmo impossibilitam tal mudança. Dessa forma, normalmente foca-se em modificar a ferramenta ou o processo de usinagem, que também são muito desafiadores (EICHLER, 1996; SIHVO et al., 2008).

A fim de cumprir o constante aumento das exigências de qualidade das peças e diminuir os custos no processo de usinagem, os seguintes parâmetros relevantes a esses requerimentos devem ser considerados: geometria da aresta de corte, parâmetros de corte, materiais e revestimentos utilizados na fabricação das ferramentas, mecanismos de desgaste e cinemática do processo (KLOCKE et al. 2011).

A definição da microgeometria da ferramenta a fim de melhorar o desempenho é alcançada através de sensíveis alterações na geometria da aresta de corte, pois a aresta é a região mais suscetível ao desgaste. A preparação da aresta normalmente é realizada por um processo adicional ao de afiação, como escovamento, jateamento, polimento ou retificação (BYRNE et al., 2007). Neste trabalho, será abordado o processo de arredondamento de arestas de corte.

Inúmeros trabalhos experimentais e estudos teóricos relacionados a torneamento ou fresamento demonstraram que o raio da aresta de corte pode influenciar em vários aspectos fundamentais da usinagem, tais como forças de corte, temperatura, desgaste e vida da ferramenta, formação e fluxo do cavaco, qualidade superficial da superfície usinada e confiabilidade do processo. Entretanto, estudos

experimentais em furação são muito escassos, principalmente em furação profunda. (CHEUNG et al., 2008; DENKENA et al., 2012).

O processo de furação a ser estudado refere-se a um componente de injeção diesel fabricado por uma empresa do segmento de autopeças, o qual utiliza um furo para admissão do combustível injetado a altas pressões (na casa de 2200 bar). Por se tratar de uma aplicação crítica, o material utilizado na peça, aço SAE 4144M, é um aço liga e apresenta alta resistência à pressão e fadiga, poucas inclusões e permite tratamento térmico de endurecimento (WOSNIAK et al., 2009).

Neste caso deve-se considerar o histórico de problemas no que tange à operação em questão. Em muitos casos observa-se uma deposição de material na parede do furo, à qual denomina-se “*overlapping*”, que em inglês significa “sobreposição”, “imbricação” (TAYLOR, 2000). Este fenômeno pode ocasionar o comprometimento do componente e será melhor abordado no desenvolvimento do trabalho.

1.2 Caracterização do Problema

Os processos de preparação da aresta de corte visam basicamente, através da modificação da microgeometria, definir um perfil arredondado e reduzir os problemas encontrados durante a usinagem em arestas sem preparação. Os problemas mais comuns em arestas sem arredondamento são trincas, microlascamento e quebras (CHEUNG et al., 2008; BIERMANN et al., 2008).

Em setores automobilísticos, as falhas relacionadas à aresta de corte têm sido estudadas por vários pesquisadores da área de engenharia. Entretanto, como as pesquisas apresentam um direcionamento em torneamento e fresamento, os poucos relatos sobre furação profunda com broca canhão dificultam e tornam muito desafiadora as pesquisas nessa aplicação específica (DENKENA et al., 2012; CHEUNG, et al. 2008).

O processo de furação profunda define-se pela relação “profundidade-diâmetro” (L/D) maior que cinco vezes e distingue-se da furação convencional, pois além dos problemas convencionais da furação, existem também os problemas relacionados à refrigeração da aresta de corte e à remoção de cavaco, os quais dificultam o processo de usinagem (CASTILHO, 2005; WOSNIAK, 2011).

Há também o problema relacionado à usinabilidade do material do corpo de prova, a qual é definida como a grandeza que indica a dificuldade de se usinar um determinado material. A usinabilidade depende das propriedades da matéria-prima e do modo em que esse material é usinado. Como o material da peça é um aço liga endurecido com alta resistência à pressão e fadiga, considera-se o material de baixa usinabilidade e, portanto, mais um agravante ao processo de furação profunda (MACHADO, 1998; WOSNIAK 2009).

1.3 Objetivos

O desenvolvimento deste trabalho apresenta objetivos gerais e específicos que são apresentados a seguir:

1.3.1 Objetivos Gerais

O propósito geral deste trabalho é analisar a possibilidade de utilizar brocas canhão preparadas pelo processo automático de proteção de arestas em substituição a brocas canhão preparadas manualmente e simplesmente afiadas no processo de furação profunda do aço SAE 4144M endurecido. Serão levados em conta aspectos como o desgaste na aresta de corte da ferramenta e vida útil da mesma.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver o processo de preparação de aresta automático para a ferramenta de corte selecionada.
- Caracterizar o desgaste da ferramenta.
- Avaliar a vida útil obtida com o processo de preparação.

1.4 Justificativa

A justificativa em escolher o processo de furação profunda se dá primeiramente por sua vasta utilização, visto a ampla gama de componentes que possuem furos com relações L/D maiores que cinco, como por exemplo virabrequins, cilindros hidráulicos, elementos de motores a diesel, turbinas, trocadores de calor (CASTILHO, 2005; WOSNIAK, 2011). Outro motivo está nos vários problemas encontrados e conseqüentemente custos envolvidos em um processo complexo de furação profunda em aço de baixa usinabilidade. Problemas desde alto índice de

quebra de broca, baixa vida útil da ferramenta e alto tempo de ciclo e ainda, impacto na produtividade e prazos de entrega (KOENIG et al., 1997).

Foi observado que os procedimentos de preparação de aresta em brocas helicoidais influenciam as condições do furo, principalmente em termos de circularidade e rugosidade, conforme investigado por Santana (2015). No entanto, não foi observado ganho de qualidade em relação aos diâmetros obtidos quando se compara brocas helicoidais com arestas de cortes arredondadas e afiadas. Desta forma, devido a essas condições, somadas à complexidade de se investigar os efeitos na ferramenta e na peça, optou-se por focar a investigação no desgaste sofrido pela ferramenta de corte, de modo a vislumbrar um aumento de vida útil da mesma, aliando assim os interesses acadêmicos e da empresa envolvida na pesquisa.

A partir disso, desenvolveu-se esse estudo na área de manufatura em conjunto com a Empresa Multinacional do seguimento de autopeças, com foco na produção de componentes de sistemas diesel, no caso um porta-injetor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo de furação

O processo de furação é classificado como um processo mecânico de usinagem, do qual se obtém um furo com provável forma cilíndrica em uma peça através de uma ferramenta rotativa multicortante. A realização do processo ocorre através do giro da ferramenta ou da peça e concomitantemente a ferramenta ou a peça se desloca em uma trajetória retilínea, geralmente coincidente ou paralelamente ao eixo da máquina (FERRARESI, 1970).

Visto que somente uma pequena parcela das peças já apresenta o furo pronto proveniente do processo anterior à usinagem como fundição, forjamento, sinterização, em muitos casos as peças terão de ser furadas em cheio, quando não existir o furo, ou estes serão aumentados em caso de já preexistirem (DINIZ et al., 2006).

Conforme o Gráfico 1, um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria de manufatura, a furação está presente em aproximadamente 36% das operações de usinagem, seguida pelo fresamento com 30%, rosqueamento com 16% e demais processos com 18%. Do tempo total dos processos de usinagem, o processo de furação é o que consome mais tempo totalizando 41%, seguido pelo fresamento com 37%, mandrilamento com 14% e 8% para os demais processos (ABELE et al., 2007).

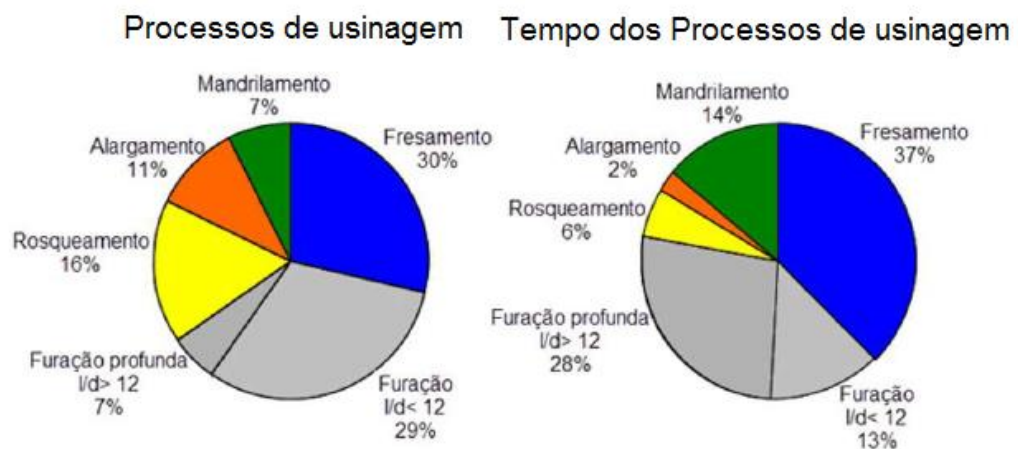


Gráfico 1 – Participação e tempos dos processos de furação.

Fonte: Abele et al., 2007 apud Santana, 2015.

A operação de furação ocorre de maneira diferente a outros processos, como por exemplo torneamento ou fresamento, pois a velocidade de corte não é uniforme e varia de zero até o valor máximo, a partir do centro até a parede do furo, respectivamente. Outra diferença dá-se devido à geometria característica de um furo, pois há a dificuldade de expulsão do cavaco e de o fluido de corte chegar até a aresta de corte. Com isso, o mesmo atua não somente como refrigerante e lubrificante, mas também como meio de remoção do cavaco (STEMMER, 2008).

Dependendo dos parâmetros de corte utilizados, a furação pode se caracterizar como uma operação de desbaste, da qual são necessários processos subsequentes de acabamento como torneamento interno, alargamento e brunimento. Esses processos adicionais provêm melhor acabamento superficial, precisão dimensional, forma e alinhamento, porém demandam maior tempo de usinagem e acarretam em custos adicionais. Na furação deve-se levar em conta os seguintes aspectos: diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma e de medidas e volumes de produção (STEMMER, 2008).

No processo com geometria definida, após a ponta da ferramenta incidir sobre o material da peça, a aresta de corte começa a usinagem deformando o material elasticamente. Após a tensão ultrapassar a tensão de escoamento, o material começa a escoar e deformar plasticamente. Esse material desliza sobre a superfície de saída e passa a formar um tipo de cavaco conforme a geometria da ferramenta. A energia térmica proveniente da energia mecânica envolvida no processo é dissipada principalmente pelo cavaco, mas também pela peça e ferramenta (KÖNIG et al., 1997).

Diversos fatores dentre o tipo de processo, material da peça, equipamentos, parâmetros de usinagem, geometria da ferramenta, influem na qualidade, precisão e imperfeições geométricas do furo conforme mostrado na Figura 1 (WICK et al., 1988).

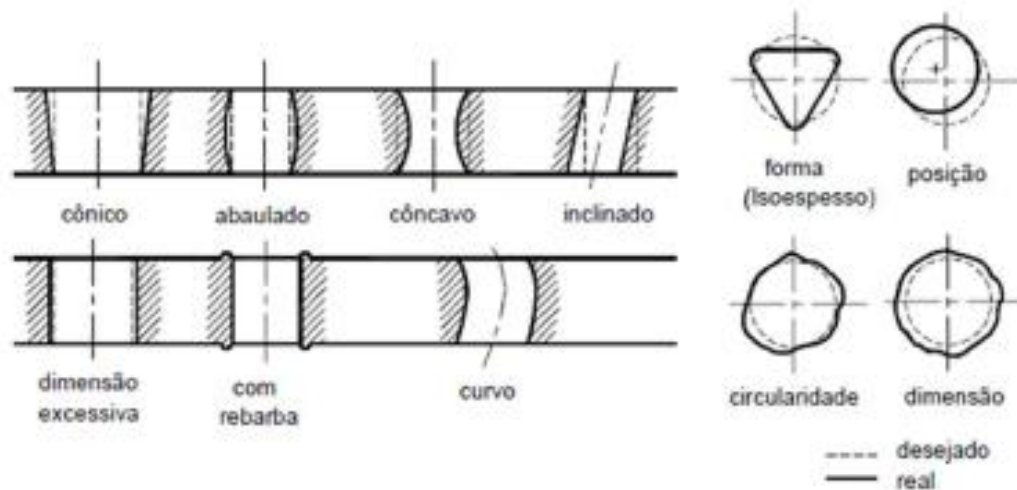


Figura 1 - Imperfeições processo de furação

Fonte: Wick, 1998 apud Santana, 2015.

2.2 Furação profunda

A maioria das operações de furação na indústria são relativas à furos curtos, com relação L/D menor que 5 vezes. Entretanto, no segmento automobilístico existem muitas operações com relação L/D maior do que 5 vezes, as quais são denominadas de furação profunda e exigem equipamentos e ferramentas especialmente desenvolvidas para essa aplicação. O recente *downsizing* e a miniaturização dos componentes corroboram para aumentar ainda mais a importância da furação profunda de pequenos diâmetros (DINIZ *et al.*, 2006; CASTILHO, 2005; BIERMANN, 2015).

A expulsão dos cavacos em furação convencional é um inconveniente. Para L/D maior que cinco vezes, o problema torna-se crítico pela dificuldade da remoção do cavaco através dos canais da ferramenta, gerando muitas quebras pelo entupimento de cavacos e conseqüente travamento da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2013; FERRARESI, 2003; KÖNIG *et al.*, 1997).

Outro problema na furação profunda é a condução do fluido de refrigeração e lubrificação até a aresta da ferramenta. Um sistema externo de condução pode ser insuficiente, sendo necessário a utilização de um sistema de condução interno através dos furos de refrigeração internos da broca, de modo a levar o fluido até a região de corte, lubrificando e refrigerando a aresta, reduzindo o atrito e temperatura

e auxiliando na remoção do cavaco através dos canais da ferramenta (DINIZ et al., 2013; FERRARESI, 2003; KÖNIG et al., 1997).

Como o fluido de corte é responsável também pelo transporte de cavacos, a qualidade superficial dos furos na furação profunda está intimamente ligada à alimentação desse fluido. Com isso fluido deve ser fortemente pressurizado através dos furos de refrigeração (CASTILHO, 2005; STEMMER, 2008).

2.3 Broca canhão

Segundo Stemmer (1995), para furos com relação L/D entre 10 e 100 as brocas canhão apresentam diversas vantagens em relação às helicoidais:

- a) A eficiência das guias faz com que não ocorram desvios comparados à broca helicoidal.
- b) A retirada de cavaco é facilitada devido ao maior espaço do canal, não sendo necessário interromper o processo de usinagem e retirar a broca constantemente para remoção do cavaco.
- c) Em furos de pequeno diâmetro, os canais de refrigeração fazem com que o fluido chegue até a aresta de corte.

Outra vantagem em utilizar brocas canhão é o melhor acabamento superficial, com rugosidade Rz na ordem de 1 μm , obtido quando comparado ao processo com broca helicoidal na ordem de 10 μm (BIERMANN, et al. 2011, GROTE, et. al. 2009).

Na Figura 2 é um exemplo de broca canhão de metal duro inteiriça, a qual é constituída de duas partes: a cabeça junto com o canal da broca e a haste. Essas duas partes são unidas através de uma solda especial. Por ser inteiriça, a ferramenta possui longa vida útil devido à alta rigidez, a menores deflexões e conseqüentemente baixas vibrações de torção e menores desvios de posição do furo. Há possibilidade de usinar diâmetros muito pequenos, utilizar grandes taxas de avanço e reafiar várias vezes (BOTEK, 2016).

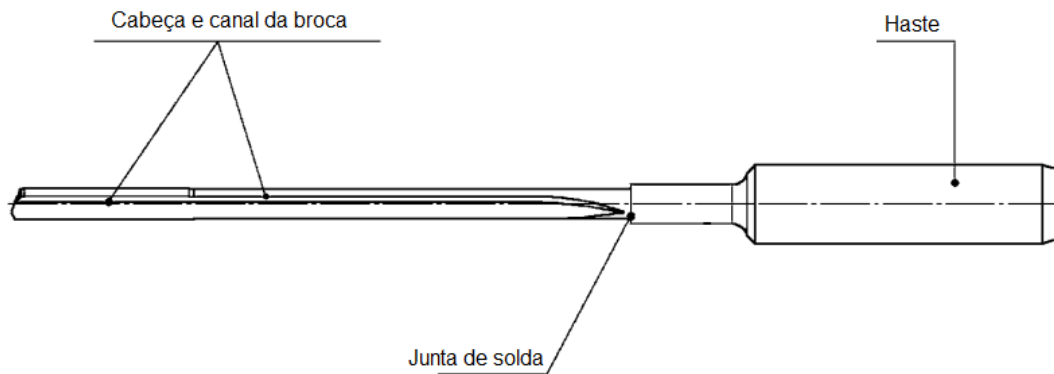


Figura 2 - Nomenclatura da broca canhão

Fonte: Adaptado de Botek, 2016.

A Figura 3 mostra os comprimentos de cada parte da broca canhão. A região da cabeça da ferramenta apresenta o diâmetro do furo a ser usinado, de modo que a região do comprimento do furo e saída de cavaco possui diâmetro menor e não entra em contato com a parede do furo. A profundidade do furo deve ser especificada para determinar o comprimento útil e garantir que haja o espaço restante na ferramenta até fim do canal, que é utilizado para remoção do cavaco. O comprimento útil é relacionado à reafiação da ferramenta, de modo que ao zerá-lo a ferramenta não pode ser mais utilizada naquele processo de furação e, portanto, não pode ser mais reafiada (BOTEK, 2016).

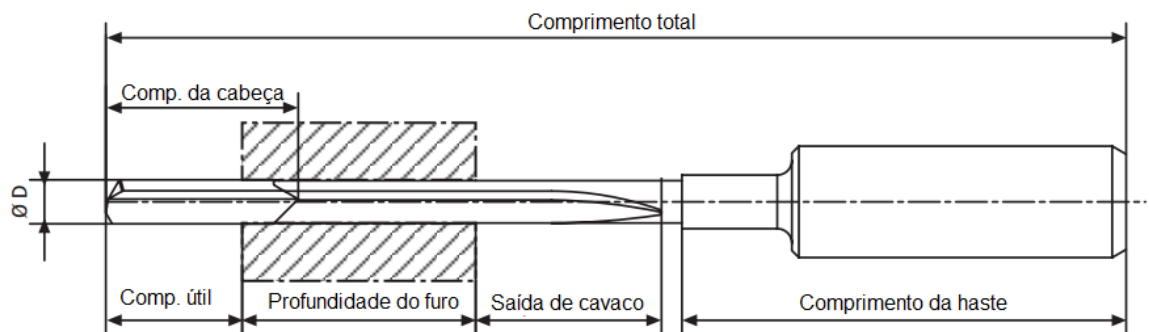


Figura 3 - Dimensões da broca canhão

Fonte: Adaptado de Botek, 2016.

Conforme mostrado na Figura 4, existem vários elementos geométricos que compõem a ponta de uma broca canhão e que precisam ser considerados na afiação:

k_1 : ângulo de posição complementar da aresta externa

k_2 : ângulo de posição complementar da aresta interna

α_1 : ângulo de folga normal da aresta externa

α_2 : ângulo de folga normal da aresta interna

α_3 : ângulo de folga secundário

m_d : distância no eixo x do ponto de furação em relação a centro de coordenadas da ferramenta

c_1 : distância no eixo y da aresta de entrada em relação a centro de coordenadas da ferramenta

c_2 : distância no eixo y da aresta de saída em relação a centro de coordenadas da ferramenta

Φ : diâmetro da ferramenta

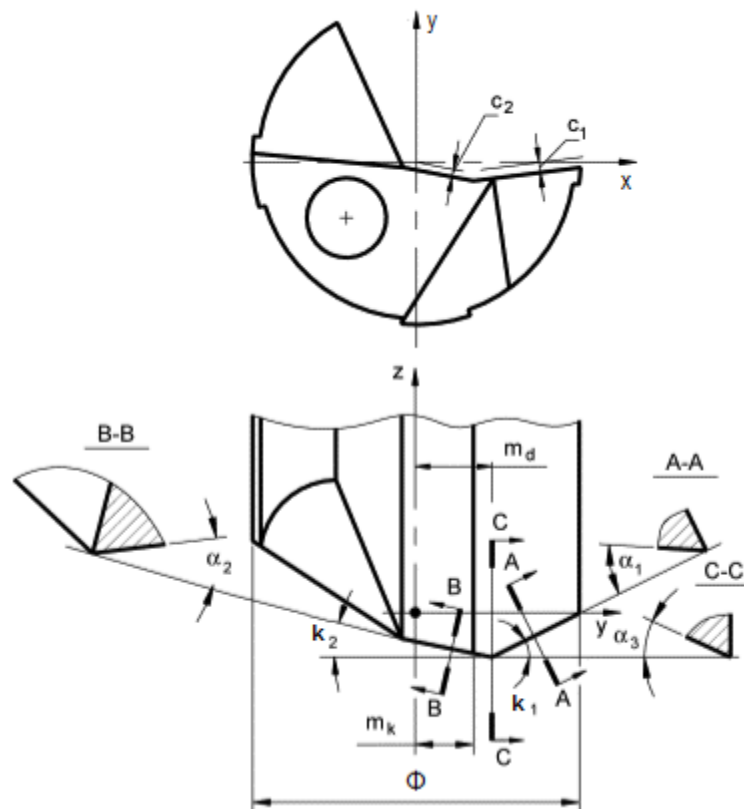


Figura 4 - Ângulos da broca canhão
 Fonte: Adaptado de Astakhov et al., 2004.

Mudanças na geometria de afiação influenciam nas dimensões e qualidade superficial do furo, forma do cavaco, pressão e quantidade do fluido de corte.

Diversos ângulos de afiação para brocas canhão foram desenvolvidos pelo fabricante durante anos, utilizando diferentes materiais nos corpos de prova. Com isso, chegou-se aos ângulos exibidos na Figura 5, os quais são considerados padrão por melhor funcionarem com a maioria dos processos e materiais. Entretanto é necessário desenvolver afiações especiais para furos com relações L/D muito grandes e para materiais com características especiais como, por exemplo, elevada dureza (ASTAKHOV et al., 2004; BOTEK, 2016). A nomenclatura dos ângulos segue conforme Figura 4.

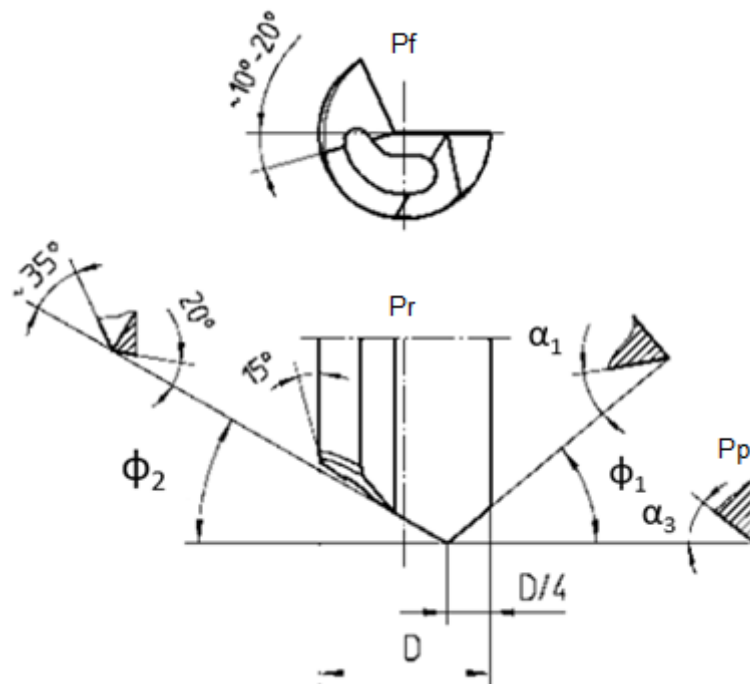


Figura 5 – Exemplo de afiação de broca canhão
 Fonte: Botek, 2016.

Conforme mostrado na Figura 6, existem dois formatos de canais de refrigeração para brocas canhão. O primeiro em formato de rim é mais utilizado em brocas de diâmetros até aproximadamente 10 mm. O segundo com dois furos circulares é mais utilizado em brocas com diâmetro acima de 10 mm. Entretanto a escolha dos formatos varia de acordo a aplicação (BOTEK, 2016).

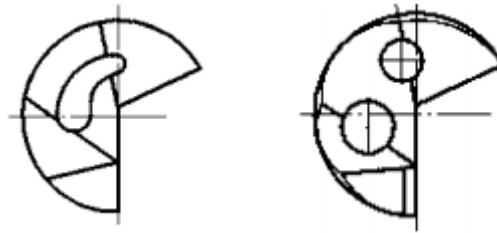


Figura 6 - Canais de refrigeração
 Fonte: Adaptado de Botek, 2016.

Existem quatro diferentes formatos externos se tratando de brocas canhão. A Figura 7 resume contornos e suas respectivas aplicabilidades. O formato G é considerado padrão por sua vasta aplicabilidade em diferentes materiais e tipos de operação. O formato C é recomendado para aços comuns e aços inox, ou seja, materiais de baixa usinabilidade. O formato EA também é recomendado para materiais de baixa usinabilidade como ferro fundido e materiais moles em geral e aplicações com furos passantes, nas quais há grandes vibrações. O formato A é recomendado tanto para alumínio quanto cobre e para furos com baixa tolerância (BOTEK, 2016).

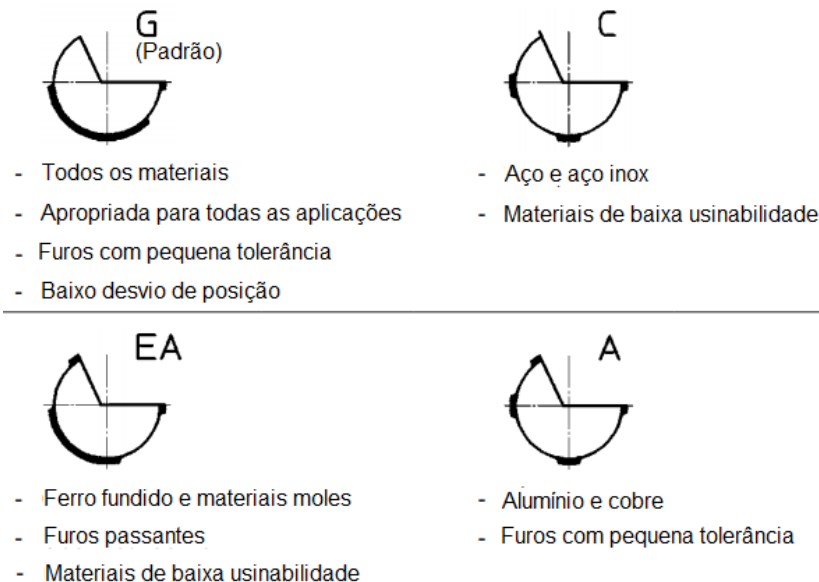


Figura 7 - Formatos externos de brocas canhão
 Fonte: Adaptado de Botek, 2016.

2.4 Materiais para fabricação de brocas

Diversos fatores são considerados ao escolher o material de fabricação da ferramenta, dentre eles o material da peça e suas respectivas características como dureza, tenacidade à fratura, o tipo de usinagem, dimensão do furo, condição dos equipamentos utilizados e custos (DINIZ et al., 2006).

As propriedades mais importantes e qual material deve ser escolhido para fabricar a ferramenta estão relacionadas à velocidade de corte e avanço utilizados no processo. Quanto maior a velocidade de corte, maior a necessidade de o material ser resistente ao desgaste e manter a dureza a quente. Quanto maior o avanço, maior deve ser a tenacidade e resistência à flexão (KLOCKE et al., 2011)

Os materiais mais utilizados na fabricação de ferramentas são aços rápidos (HSS) e o metal duro. Os HSS apresentam elementos de liga como molibdênio, vanádio, tungstênio, cobalto e cromo, os quais determinam alta resistência mecânica e tenacidade à broca. Os aços rápidos possuem vasta aplicabilidade, desde operações como alargamento, fresamento, torneamento, entre outras (KLOCKE et al., 2011).

Ferramentas de metal-duro representam a maior parte das brocas utilizadas na indústria por apresentarem melhor custo-benefício, maior dureza e resistência a quente em relação às ferramentas de HSS. Os constituintes dos metais-duros são um ligante metálico dúctil de cobalto e carbonetos de metais de transição como tungstênio, titânio, nióbio e tântalo (KLOCKE et al., 2011).

2.5 Revestimentos

A utilização de revestimentos em ferramentas visa aumentar a vida útil por depositar fisicamente ou quimicamente finas camadas de materiais com baixo coeficiente de atrito, alta dureza, alta resistência mecânica, térmica e ao desgaste mesmo sob condições críticas de usinagem com elevadas temperaturas (KLOCKE et al., 1999).

Com a grande evolução dos revestimentos na últimas décadas, atualmente utiliza-se largamente o nitreto de titânio (TiN), que apresenta alta dureza, baixo coeficiente de atrito e coloração dourada; o nitreto de titânio-alumínio (AlTiN), que possui alta tenacidade e estabilidade à oxidação; carbonitreto de titânio (TiCN) com

maior dureza e menor atrito comparado ao TiN; e nitreto de cromo-alumínio (AlCrN), recentemente desenvolvido, que apresenta ótimas propriedades mecânicas e maior resistência à oxidação, quando comparado com AlTiN (BANAKH et al., 2003; BUNSHAH, 2001).

Os processos de deposição comumente utilizados são o CVD (Deposição Química de Vapor do inglês *Chemical Vapor Deposition*) e o PVD (Deposição física de Vapor do inglês *Physical Vapor Deposition*).

A deposição pelo processo de CVD ocorre sob temperaturas entre 200 e 1600°C através de uma reação química, na qual átomos, moléculas ou ambos juntos de um determinado elemento são depositados sobre uma superfície quente, na fase de vapor. Como no CVD, o PVD também é um processo de deposição de átomos, moléculas ou ambos juntos, entretanto a deposição ocorre por condensação, evaporação, pulverização, ou seja, meios físicos sob temperatura entre 150 e 500°C. A tendência recentemente é de combinação de ambos os processos, pois os processos de CVD têm utilizado o plasma, que é um fenômeno físico. Reciprocamente os processos de evaporação, pulverização ocorrem em meio químico. Com isso as diferenças entre eles tornam-se cada vez menores (PIERSON, 1999).

2.6 Movimentos relativos durante a usinagem

O movimento de corte mostrado na Figura 8 pode ser definido como o movimento entre a peça e a ferramenta, que sem o movimento de avanço gera somente uma única remoção de cavaco durante uma rotação. O movimento de avanço é o movimento entre a peça e a ferramenta, que em combinação com o movimento de corte gera a formação de cavaco. O movimento de avanço pode ser resultante de diferentes componentes, como o movimento de avanço principal, movimento de avanço lateral e movimento efetivo de corte, que é resultante dos movimentos de corte e avanço (FERRARESI, 1970).

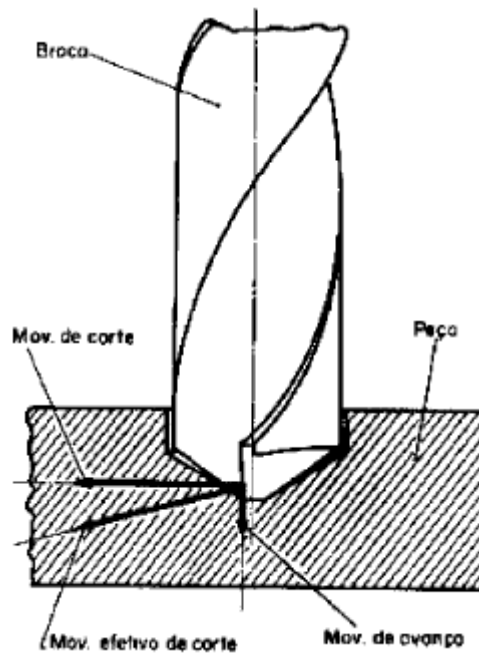


Figura 8 - Movimentos de corte e avanço na furacão

Fonte: Ferraresi, 1970.

A velocidade de corte (V_c), dada pela equaco (1),  a velocidade no instante em determinado ponto localizado na aresta de corte, na direção e sentido de corte. A velocidade de avanço (V_f), dada pela equaco (2),  a velocidade no instante da ferramenta, na direção e sentido de avanço (FERRARESI, 1970).

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c - velocidade de corte (m/min);

D - diâmetro da ferramenta (mm);

n - rotação do eixo principal (rot/min);

$$V_f = f \times n \quad (2)$$

Onde:

V_f - velocidade de avanço (mm/min);

f - avanço por rotação (mm/rot);

n - rotação do eixo principal (rot/min);

2.7 Forças e momentos de corte

Segundo Stemmer (1995), as resistências existentes durante o processo de furação com broca helicoidal são:

- a) Resistência relacionada ao corte do material pela aresta de corte;
- b) Resistência relacionada ao corte e esmagamento pela aresta transversal de corte;
- c) Resistência relacionada ao atrito entre as guias com a parede do furo e entre os canais da ferramenta e o cavaco;

A Figura 9 mostra as forças atuantes em um processo de usinagem com broca canhão. Essas forças, divididas em forças normais e de atrito, são distribuídas continuamente sobre o contato com a ferramenta em diferentes direções. As forças normais nas arestas principais de corte são provenientes do corte do material da peça. As forças de atrito nas arestas principais representam as forças de interferência de acordo com o escoamento de cavaco. As forças normais atuando no contorno da ferramenta são as reações das forças normais atuantes nas arestas principais. As forças de atrito atuando no contorno da ferramenta são devido ao contato com a parede do furo (JUNG et al., 2006).

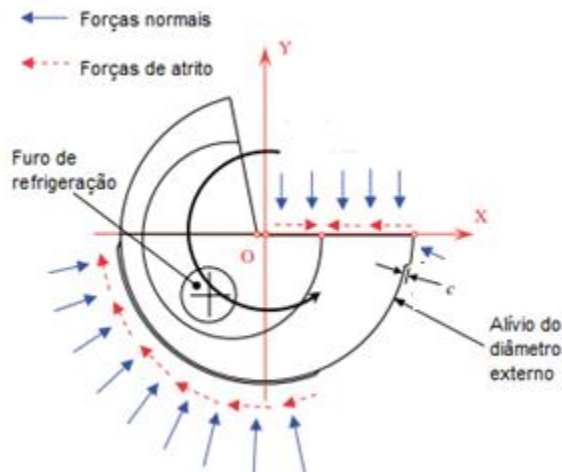


Figura 9 - Forças atuantes na broca canhão

Fonte: Adaptado de Jung et al., 2006.

2.8 Usinabilidade

A usinabilidade de um material, pode ser definida como uma propriedade que resume as dificuldades para usiná-lo em função das propriedades do material como dureza, resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e a taxa de encruamento, as quais influenciam no processo de usinagem (KOENIG, 1997).

Além das propriedades do material, a usinabilidade depende também das condições da aresta da ferramenta em suportar esforços, condições de usinagem, rigidez do sistema máquina-ferramenta, tipo de operação realizada pela ferramenta (corte contínuo, intermitente, posição de usinagem, condições de entrada e saída da ferramenta, entre outros). Isso torna muito difícil de mensurá-la podendo um determinado material apresentar um alto valor de usinabilidade em determinadas condições, mas um baixo em outras (DINIZ, 2006).

Existem diferentes critérios para medição da usinabilidade sendo geralmente utilizados: vida da ferramenta, força de usinagem, qualidade superficial da peça, forma e tamanho dos cavacos (KOENIG, 1997).

2.9 Aço SAE 4144M

Trata-se de um aço utilizado somente na indústria automobilística, sendo fabricado exclusivamente para esse fim. Suas propriedades mecânicas e estrutura química são semelhantes à do aço SAE 4140, conforme Tabela 1 (MARMENTINI, 2007).

Tabela 1 - Comparação entre os aços SAE 4144M e 4140

Material	Qtde. (%)	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo
SAE 4144M	Mín.	0,42	0,90	-	0,01	0,20	-	1,15	-	0,25
	Máx.	0,46	1,00	0,025	0,02	0,30	0,35	1,30	0,25	0,35
SAE 4140	Mín.	0,37	0,65	-	-	0,15	-	0,75	-	0,15
	Máx.	0,44	1,10	0,035	0,04	0,30	-	1,20	-	0,30

Fonte: Adaptado de Cardoso apud Marmentini, 2007.

De acordo com a classificação normativa SAE, os dígitos “41” indicam um aço baixa liga ao cromo e molibdênio, enquanto os dígitos “44” indicam um teor médio de 0,44% de carbono. Já o vocábulo “M” indica a condição de aço modificado, na qual há um controle sobre as quantidades de elementos de liga, de forma a atender aos requisitos de aplicação na qual o material é utilizado (Cardoso, 2015 apud Callister, 2000).

2.10 Avarias e desgastes da ferramenta

Segundo Diniz et al. (2006), diferentes tipos de desgaste ocorrem em uma ferramenta de usinagem, dentre eles os principais são:

- a) Desgaste de flanco (ou frontal): presente em todo processo de usinagem, é desgaste devido ao contato da superfície de folga e a peça. Normalmente monitora-se para saber as condições de usinagem por ser o tipo de desgaste que mais ocorre na ferramenta;
- b) Desgaste de cratera: causado pelo atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, é o tipo de desgaste que pode não ocorrer em alguns processos de usinagem com ferramentas de metal duro com revestimento. O aumento do desgaste de cratera pode ocasionar a ruptura da ferramenta, quando se encontra com o desgaste de flanco;
- c) Deformação plástica da aresta de corte: é um tipo de avaria devido a uma combinação de altas pressões com elevada temperatura na ponta da ferramenta. Isso gera descontrole na formação de cavaco e piora no acabamento superficial da peça;

- d) Lascamento: é um tipo de avaria devido à retirada abrupta de partículas maiores quando comparadas às partículas retiradas continuamente nos desgastes de flanco e cratera. Ocorre normalmente em partículas de material frágil ou quando a aresta de corte não é reforçada. Pioram o acabamento superficial da peça e pode gerar a quebra da ferramenta.
- e) Trincas: Outro tipo de avaria que ocorre devido à variação térmica e/ou esforços mecânico. Trincas perpendiculares à aresta de corte são devido à variação de temperatura que ocorre geralmente quando se utiliza grandes quantidades de fluídos refrigerantes. Trincas paralelas são provenientes de esforços mecânicos, oriundos de cortes interrompidos, acesso irregular do fluido de corte, entre outros.

Conforme mostrado na Figura 10, existem diferentes tipos de desgastes em diversas superfícies de uma ferramenta rotativa durante o processo de usinagem (BORK, 1995).

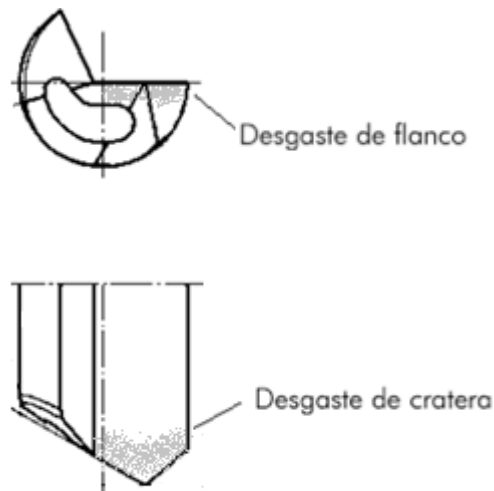


Figura 10 - Principais tipos de desgaste em uma broca canhão

Fonte: Autoria própria.

2.11 Mecanismos de desgaste

Segundo Diniz (2006), diferentes mecanismos de desgaste ocorrem em uma ferramenta de usinagem, dentre eles os principais são:

- a) Abrasão mecânica: é um dos principais mecanismos de desgaste que ocorrem na superfície de folga e de saída da ferramenta devido ao atrito

com a peça e o cavaco respectivamente. O desgaste por abrasão é acentuado conforme aumenta a dureza do material da peça e pela temperatura de corte;

- b) Aderência: mecanismo proveniente do contato entre duas superfícies com cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte formando um extrato metálico. Esse fenômeno ocorre tanto na formação da aresta postiça, que consiste em uma camada de cavaco, que em uma combinação de forças e temperaturas adere sobre a superfície de saída da ferramenta conforme exemplificado na Figura 11. Com isso essa camada de cavaco sobre a superfície passa a atuar como a aresta de corte da ferramenta alterando as forças de corte, acabamento superficial da peça, desgaste da ferramenta. Conforme a usinagem ocorre e o fluxo de cavacos passa pela aresta postiça, pode ocorrer o desprendimento dessa camada de cavaco e conseqüentemente arranca partículas da superfície aderida à ferramenta culminando na quebra da ferramenta;
- c) Difusão: fenômeno dependente da temperatura e afinidade físico-química entre os materiais envolvidos, que ocorre microscopicamente na região de corte através da transferência principalmente de átomos da peça para ferramenta. Com isso há a mudança nas condições de equilíbrio químico do material da ferramenta e conseqüente alteração de suas propriedades.

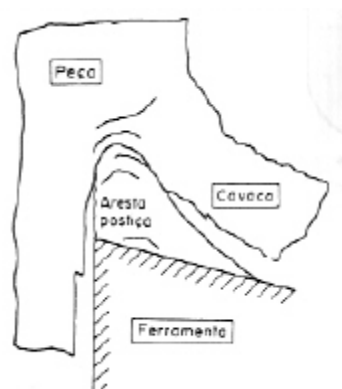


Figura 11 - Aresta postiça de corte

Fonte: Diniz et al., 2006.

- d) Oxidação: o desgaste por oxidação ocorre normalmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta pela grande presença de ar nessa região e pela existência de ar e água nos fluidos de corte.

2.12 Critério para fim da vida útil da ferramenta

Segundo Stemmer (1993), o critério para fim da vida útil da ferramenta é definido como um valor de desgaste limite preestabelecido ou a ocorrência de algum fenômeno durante o processo de usinagem. Na prática as operações de usinagem não geram desgastes uniformes na ferramenta ao longo da vida útil. Com isso, é necessário especificar o local e o grau de desgaste aceitável para a troca da ferramenta.

Segundo Stemmer (1993), existem vários critérios para fim de vida da ferramenta. O desgaste de flanco é o mais utilizado para determinação do fim de vida de ferramentas de metal duro. O autor cita a largura do desgaste na ordem de 0,8 a 2 mm para aço rápido. Outro parâmetro para o fim de vida seria a profundidade K_t da cratera ou a distância K_L entre a aresta de corte e o início da cratera, conforme mostrados na Figura 12 - Desgaste de cratera. Por fim também é citado a deficiência de acabamento superficial como parâmetro a ser utilizado, no qual uma mudança notória e repentina ocorre e isso determina o fim da vida da ferramenta.

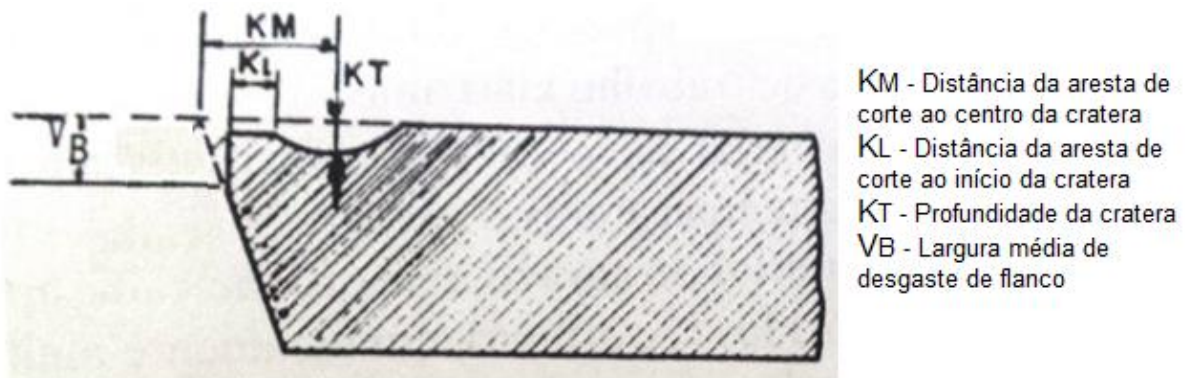


Figura 12 - Desgaste de cratera

Fonte: Stemmer, 1993.

2.13 Preparação das arestas de corte

Os quatro aspectos técnicos mais importantes para uma boa ferramenta de corte são a composição do material base da ferramenta, microgeometria, revestimento e a proteção das arestas de corte. Entretanto a proteção de arestas

não é tão pesquisada e aplicada quanto os outros aspectos, necessitando desenvolvê-la e torná-la um processo vastamente utilizado (SME, 1999).

A preparação da aresta de corte, através da modificação geométrica da superfície na região da aresta, influencia em diversos aspectos como a forma da zona de deformação do material, distribuição da temperatura de corte, forças de usinagem, forma e fluxo do cavaco, a qualidade superficial da peça e, conseqüentemente, afeta a vida útil da ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009; SME, 1999; DENKENA et al., 2011).

Conforme mostrado na Figura 13, diferentes formas geométricas podem ser obtidas da preparação da aresta, dentre elas: forma chanfrada e arredondada. Segundo Rodriguez (2009), notou-se que as formas arredondadas reduzem as solicitações mecânicas, térmicas e têm influência na formação do cavaco comparadas às chanfradas. Por outro lado, Fang et al. (2005) constataram, quando no torneamento de ligas de alumínio, que a força de corte e torque são maiores para geometrias chanfradas, em relação às arredondadas.

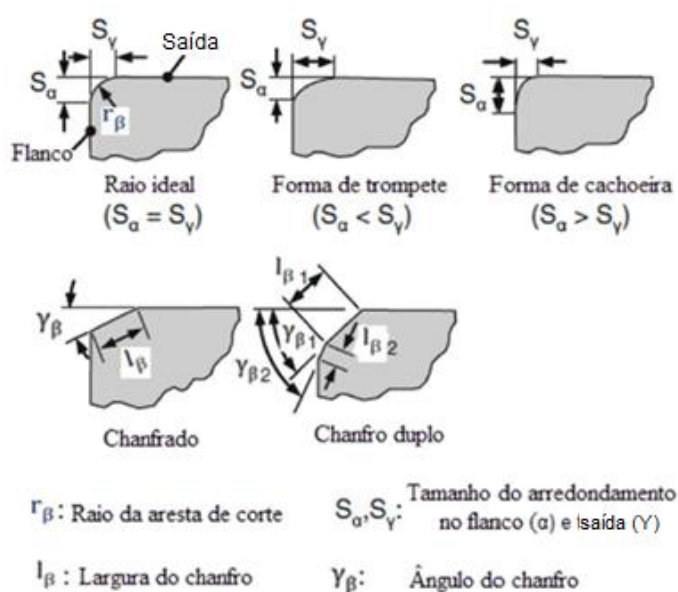


Figura 13 - Formas geométricas de preparação de arestas

Fonte: Adaptado de Rodriguez apud Santana, 2015.

O processo de arredondamento de arestas, vastamente empregado para prover melhor acabamento em engrenagens, consiste na retirada de pequenas quantidades de material da superfície da peça através de partículas abrasivas que

giram em baixas velocidades. Esse processo, que também pode ser empregado para modificar a aresta de corte da ferramenta, corrige imperfeições geométricas, permite maior controle de acabamento da superfície e não afeta termicamente a superfície por gerar pouco calor e baixo arredondamento, na ordem de dezenas de micrometros (BOOKER et al., 2014). Existem diferentes variáveis do processo:

- a) tipo e formas geométricas do abrasivo;
- b) tamanho de grão;
- c) material abrasivo;
- d) dureza;
- e) posicionamento (horizontal e vertical);
- f) tempo de processo.

Existem diferentes formas de caracterizar a geometria resultante da preparação da aresta de corte. Entretanto devido à baixa precisão dos métodos até então abordados e por depender da perícia do operador, há um questionamento de suas validades e aplicabilidades (WYEN et al., 2012; RODRÍGUEZ, 2009).

Dentre os questionamentos de Wyen et al. (2012), o autor relata os seguintes problemas: diferentes valores de raio para uma mesma geometria de aresta de corte conforme mostrado na Figura 14 (a); diferentes formas geométricas de aresta podem resultar em valores iguais de raio, exemplificado na Figura 14 (b) e (c); impossibilidade de caracterização quando a aresta é composta pelo encontro de superfícies não lineares, vide a Figura 14 (d).

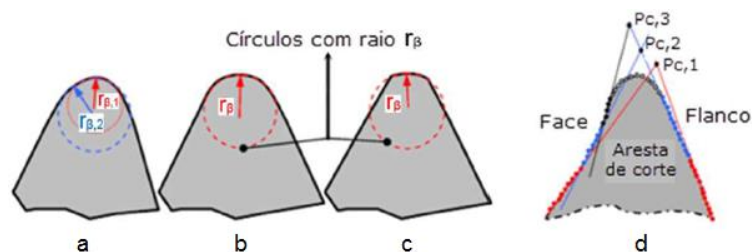


Figura 14 - Caracterização da aresta de corte

Fonte: Adaptado de Wyen et al. (2012) apud SANTANA, 2015.

Diferentes raios de aresta e seus efeitos foram analisados por Bouzakis et al. (2003) utilizando insertos de metal-duro com revestimento de TiAlN em um processo de fresamento em aço DIN 42CrMo4 conforme mostrado na Figura 15.

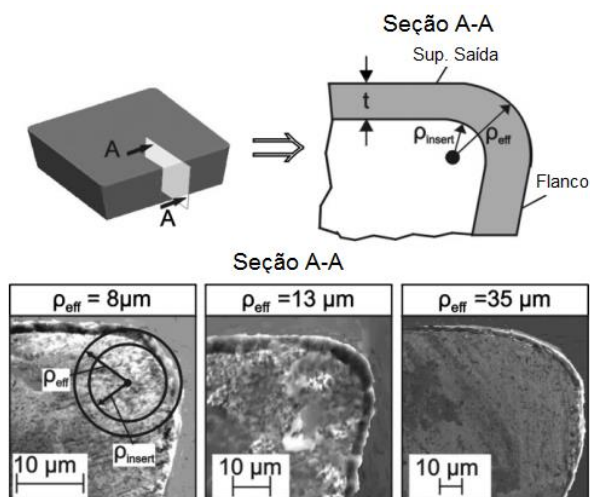


Figura 15 - Arredondamento da aresta de corte
Fonte: Adaptado de BOUZAKIS et al., 2003.

O melhor desempenho dentre os três raios arredondamentos foi obtido com o de 35 μm , o qual apresentou um desgaste de flanco de 0,2 mm com uma vida útil de 20×10^4 cortes. Enquanto para o mesmo desgaste de flanco a ferramenta com arredondamento de 8 μm realizou somente $5,5 \times 10^4$ cortes, ou seja, menos que 70% da vida útil comparada à primeira (BOUZAKIS et al., 2003).

Conforme mostrado na Figura 16, a microgeometria da aresta influencia diretamente a vida útil da ferramenta, variando a relação “K” dos parâmetros de distância entre o vértice da aresta de corte e o ponto de tangencia do arredondamento da aresta nas superfícies de saída (S_γ) e folga (S_α) conforme a equação (1) (DENKENA et al. 2012).

$$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha} \quad (1)$$

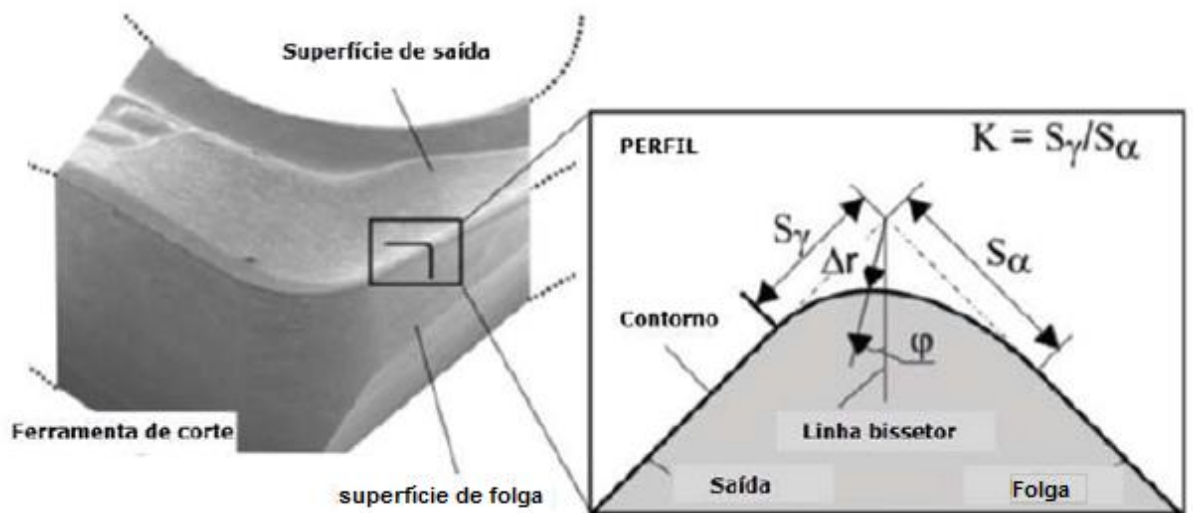


Figura 16 - Microgeometria da aresta de corte

Fonte: Adaptado de Denkena et al. 2012 apud Santana, 2015.

Conforme mostrado no Gráfico 2, a vida útil é drasticamente reduzida em dois pontos: para valores de arredondamento grandes, ou seja, ferramenta passa a não ter poder de corte gerando alta potência de corte; e para valores muito pequenos, os quais propiciam baixa resistência mecânica (Santana, 2015 apud Denkena et al. 2012).

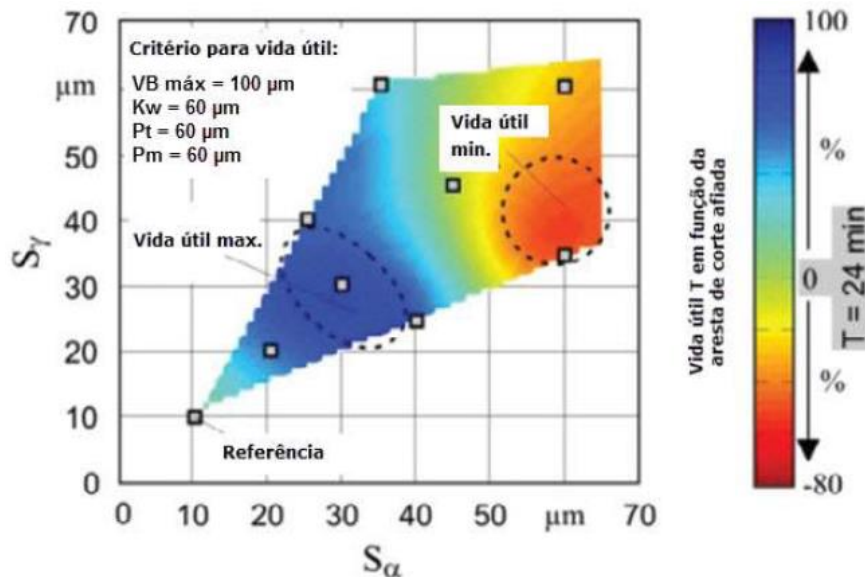


Gráfico 2 - Influência dos parâmetros S_γ e S_α na vida útil da ferramenta

Fonte: Santana, 2015 apud Denkena et al. 2012.

Segundo Astakhov et al. (2005), a redução da espessura do cavaco (h), conforme mostrado na Figura 17, resulta numa distribuição da força de corte sobre uma superfície de contato maior, com isso a tensão e temperatura de contato diminuem aumentando a vida útil. Essa tendência pode ser considerada até a espessura do cavaco tornar-se pequena o suficiente na mesma ordem de grandeza que o raio da aresta de corte, vide seção A-A da Figura 17, comece a influenciar significativamente. Em furação com broca canhão isso ocorre quando “R” for maior ou igual a 30% da cota h aumentando drasticamente a temperatura de contato e diminuindo a vida útil da ferramenta. O aumento do ângulo κ_2 também promove um aumento na vida útil da ferramenta, devido à diminuição da espessura do cavaco e consequentemente a redução forças axiais na ferramenta.

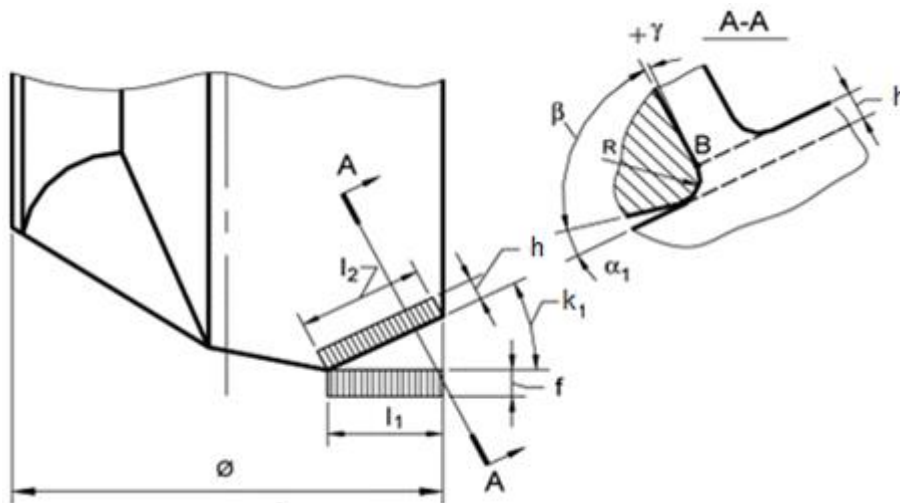


Figura 17 - Arredondamento da aresta de corte em broca canhão

Fonte: Adaptado de Astakhov et al., 2005.

2.14 Processo *Drag Finishing*

Conforme Figura 18, eventualmente conhecido como acabamento por arraste, consiste em imprimir uma mudança na microgeometria da aresta de corte (neste caso, arredondamento da mesma) através do arraste da ferramenta, rotacionalmente, dentro de um recipiente preenchido com abrasivo (OTEC PRÄZISIONSFINISH, 2016). O contato contínuo da aresta de corte com a partícula abrasiva resulta na modificação da mesma. Pode-se obter uma grande variedade de geometrias diferentes ao mudar-se os muitos parâmetros do processo.



Figura 18 - Exemplo de ferramentas em um processo *Drag Finishing*
Fonte: advancedfinish.com

Não se deve confundir *Drag Finishing* com o processo de tamboreamento, apesar de ambos serem considerados processos de usinagem de massa ou vibratória, caracterizados pela imersão do corpo a ser usinado em um meio com partículas abrasivas. No processo de tamboreamento as peças ficam soltas dentro do meio abrasivo, acarretando um acabamento uniforme em sua superfície, gerado pelo atrito promovido por movimentação, no caso de tambor rotativo, ou movimentação e vibração, quando em máquinas vibratórias (MFSA, 1989). Desta forma, tanto as peças quanto o abrasivo deslocam-se livremente. Diferentemente, no *Drag Finishing* apenas a ferramenta, que é fixada por um porta-ferramenta, sofre movimento de rotação, gerando arraste dentro do meio abrasivo armazenado em um recipiente que permanece imóvel.

Além da diferença conceitual, os dois métodos diferenciam-se também no que tange ao tempo de ciclo, conforme a Figura 19. Observa-se que o *Drag Finishing* pode ser até 40 vezes mais rápido que processos em máquinas vibratórias e 4 a 5 vezes em máquinas centrífugas (Holzknecht, 2009).

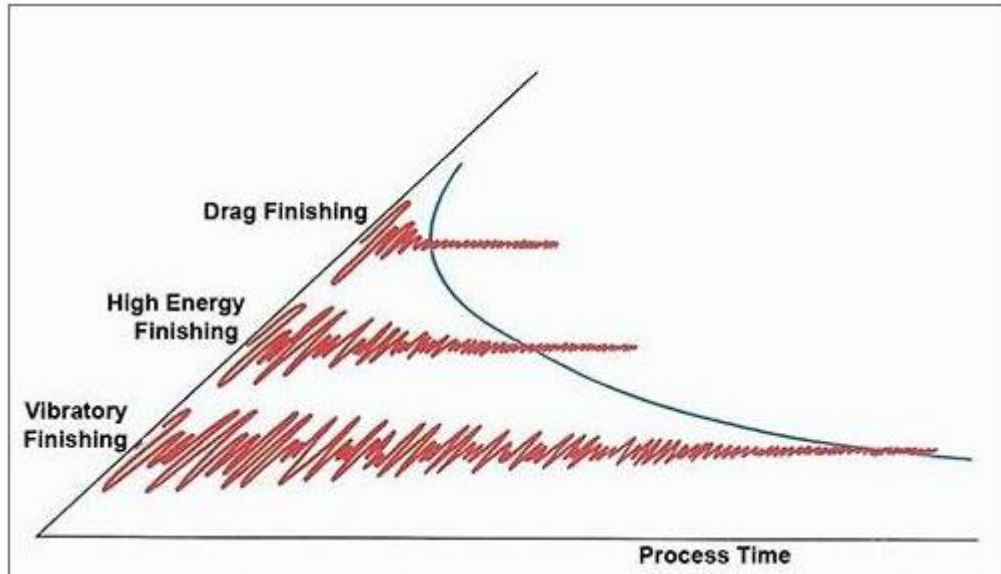


Figura 19 - Diferença no tempo de processo

Fonte: Holzknacht, 2009.

De acordo com Gegenheimer (2009), diversos fatores do processo podem influenciar o processo e o resultado final obtido:

a) Abrasivo

A correta seleção do abrasivo é preponderante e deve acontecer de acordo com o tipo de processo e tamanho do raio de aresta pretendido. Suas principais características são tamanho de grão, dureza e densidade.

Frequentemente grânulos de casca de noz são utilizados, onde aditivos para arredondamento e polimento podem ser adicionados e os tamanhos de partícula podem variar de 0,2 até 5 mm. Esse abrasivo é apropriado para polimento, rebarbação e arredondamento de aresta em uma dimensão pequena, apresentando lenta taxa de remoção.

Para ferramentas de metal duro existem outros tipos de abrasivos a serem utilizados de acordo com o grau de arredondamento e rugosidade final demandados. Por exemplo, grãos de óxido de alumínio com tamanho de até 3 mm para um arredondamento de até 60 μm ou a adição de alumínio e casca de nozes ao mesmo, para polimento e arredondamento de aresta de até 20 μm , com rugosidade de até 0,5 μm (OTEC PRÄZISIONSFINISH, 2016).

Diversos outros abrasivos podem ser utilizados, de acordo com a demanda. Por exemplo, para um maior raio de arredondamento desejado ou maior nível de rebarbação pode-se empregar granulometrias mais grossas.

b) Direção de rotação do porta-ferramentas:

De acordo com a direção escolhida, a força de usinagem resultante do contato com o abrasivo pode ser direcionada à diferentes posições da ferramenta. Em caso de rotação em sentido horário, a partícula abrasiva vai de encontro à aresta de corte, podendo ocasionar remoção e um significativo arredondamento nas arestas de corte principal e secundária. No caso de rotação no sentido anti-horário, possibilita-se um menor arredondamento aliado à excelente acabamento superficial (Figura 20). Em caso de desejar-se aliar as condições anteriores, recomenda-se utilizar uma combinação 50% horário - 50% anti-horário.

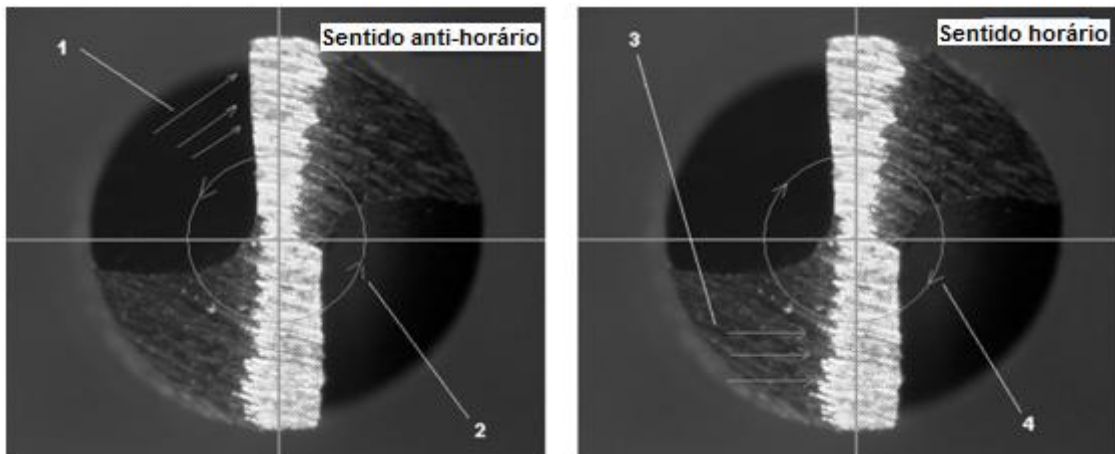


Figura 20 - Direção de trabalho do abrasivo de acordo com o sentido de rotação

Fonte: Blon, 2015 apud Gegenheimer et al., 2009.

c) Velocidade de rotação:

Determina grande parte da capacidade de remoção, sendo essa relação diretamente proporcional. Deve-se atentar para não se empregar valores demasiados altos de velocidade, pois a sobrecarga pode levar à uma usinagem irregular na aresta de corte, devido ao alinhamento incompleto entre ferramenta e abrasivo ocasionado pela alta velocidade. Ferramentas

longas e de pequeno diâmetro são particularmente vulneráveis e podem necessitar proteção através de um porta-ferramenta apropriado.

d) Tempo de processo:

Varia proporcionalmente com o tamanho da remoção desejada, desde alguns segundos até muitos minutos. Deve-se notar que o arredondamento por unidade de tempo no começo do processo é maior e então diminui gradativamente, até atingir um limite. Isto é, dependendo da mídia, apenas um tamanho de arredondamento finito pode ser alcançando.

e) Penetração da ferramenta no abrasivo:

Dependendo da profundidade da imersão é possível controlar a quantidade de arredondamento de aresta. Maiores imersões para um mesmo tempo e velocidade resultam em um maior arredondamento, devido ao aumento da pressão estática do grão aumenta com maiores profundidades, aumentando também a pressão de contato na ferramenta (RISSE et al., 2006).

O tamanho da ferramenta não possui grande influência no resultado, de acordo com Gegenheimer (2009), devido à mínima influência da autorrotação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia executada no desenvolvimento do trabalho. Na sequência, são apresentados os materiais, ferramentas e equipamentos utilizados e, por fim, cada etapa do desenvolvimento é exposta detalhadamente.

A metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho é apresentada na Figura 21 e foi definida baseada nas possibilidades de aplicação dentro da Empresa Multinacional, de acordo com o desenvolvimento experimental do processo de produção em série. Por tratar-se de um projeto executado em parceria com a Empresa, buscou-se adotar uma sistemática que permitisse a realização dos processos necessários, minimizando os impactos sofridos pela companhia, garantido o compartilhamento adequado dos recursos disponíveis e a confiabilidade dos resultados obtidos.

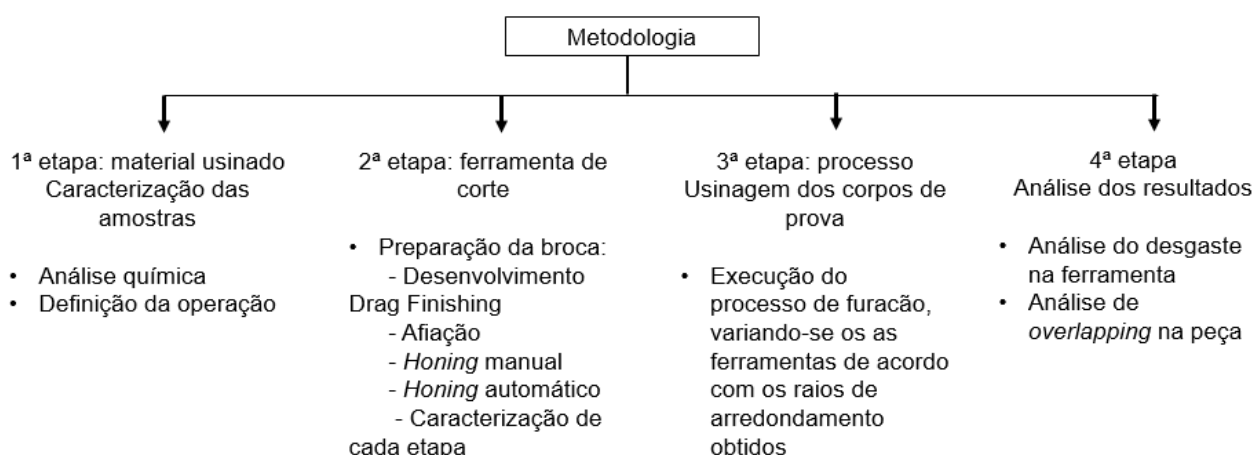


Figura 21 - Etapas do método experimental do projeto de pesquisa.

Fonte: Autoria própria.

3.1 Materiais e equipamentos

Nesta seção são descritos os materiais e equipamentos que apresentaram decisiva influência na execução do projeto. Demais dispositivos tais como máquinas de medição, câmeras e outros usados na análise e documentação dos resultados são referidos em sua primeira citação.

3.1.1 Corpo de prova

O material selecionado é o aço-liga 42CrMo4V, também denominado SAE 4144M, de acordo com a classificação normativa SAE. É fornecido pela Empresa Multinacional na mesma condição em que é utilizado na linha de produção: temperado e revenido com dureza nominal de 38 HRc. A análise química do material pós tratamento térmico é exposta na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise química do material do corpo de prova

	Especificado (%)	Verificado (%)
C	0,42 – 0,46	0,42
Si	0,20 – 0,30	0,27
Mn	0,90 – 1,10	0,90
P	Máx. 0,025	0,014
S	0,010 – 0,020	0,014
Cr	1,15 – 1,30	1,21
Ni	Máx. 0,25	0,16
Mo	0,25 – 0,35	0,28
Cu	Máx. 0,35	0,16

Fonte: Empresa Multinacional

A referida peça trata-se do porta-injetor de alta pressão *Unit Pump* fabricado pela Empresa Multinacional, conforme Figura 22.



Figura 22 – Porta-injetor *Unit Pump*

Fonte: Empresa Multinacional

O furo a ser usinado pelo processo proposto pode ser observado na Figura 23, marcado em amarelo. Tem aplicação na admissão de óleo diesel, sendo um furo de alta pressão. Suas dimensões são diâmetro de 2,5 mm e comprimento 73,85 mm, caracterizando uma relação aproximada L/D de 29. Demais características do produto ou do processo de fabricação não serão apresentados devido à confidencialidade industrial.

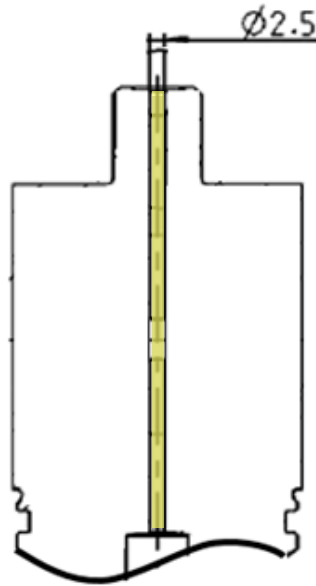


Figura 23 – Desenho esquemático do corpo de prova

Fonte: Empresa Multinacional

3.1.2 Ferramenta de corte

A broca canhão utilizada possui comprimento útil de 25 mm x diâmetro 2,5 mm (Figura 24), com comprimento mínimo de guia de 3 mm. É inteiriça de metal duro classe S20 e fornecida pela empresa Botek com forma tipo G e um canal de refrigeração interna em formato de rim. Para um gasto estimado em 3 mm a cada ciclo de vida útil, é possível reafiar a ferramenta em torno de 7 vezes.

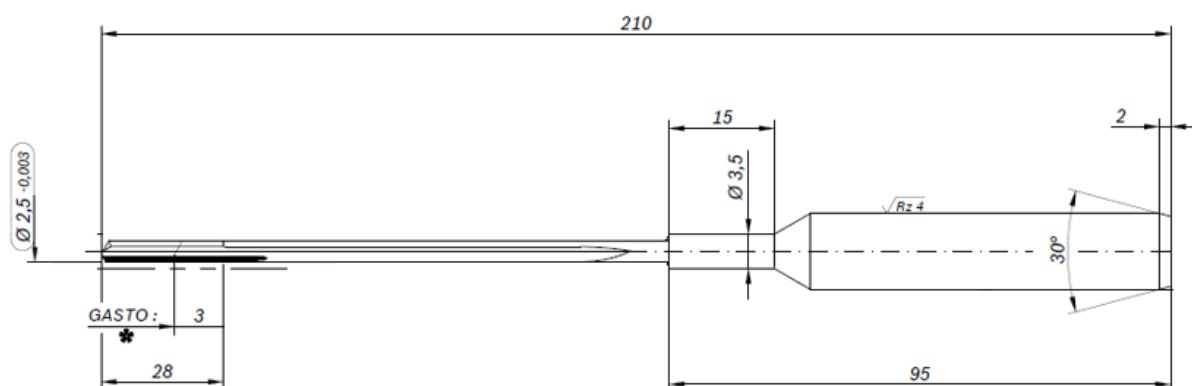


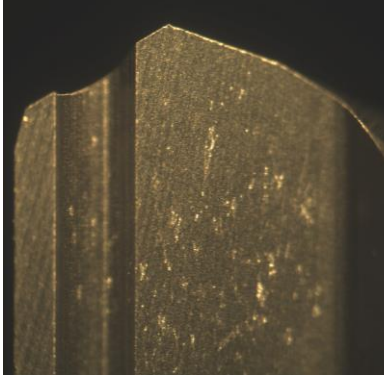
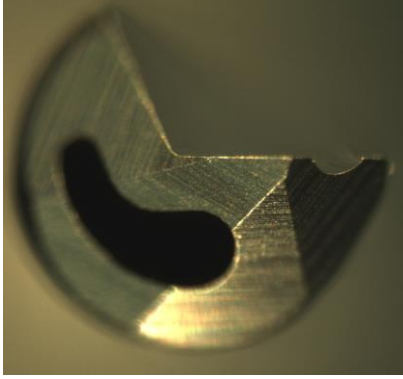
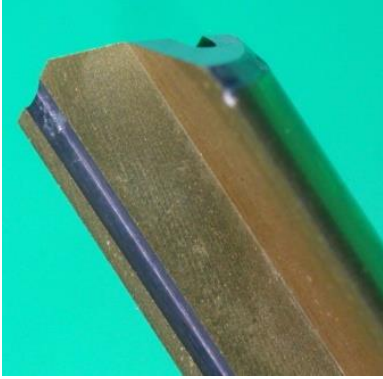
Figura 24 – Broca canhão utilizada no projeto

Fonte: Empresa Multinacional

A ferramenta, em seu estado de fornecimento pelo fabricante, apresenta revestimento de TiN ao longo da guia e dos canais de saída do cavaco. Ela é afiada previamente à primeira utilização na Empresa Multinacional, sendo efetivamente utilizada sem qualquer tipo de revestimento na aresta de corte, apenas ao longo da guia. A temperatura máxima de operação gira em torno dos 600°C , que é o valor limite para que seja mantida a integridade do revestimento (OERKILON BALZERS, 2016).

A Tabela 3 revela o estado da ferramenta pós-afiação. Na vista sobre a superfície de saída pode-se observar a presença de quebra cavaco na aresta de corte principal. As fotos foram obtidas com através de um microscópio do fabricante TecSart, que utiliza o software Metric Plus 9.1 e ampliação de 78x.

Tabela 3 - Ferramenta de corte utilizada.

Vista 1 – Plano de referência	Vista 2 – Plano de trabalho convencional	Vista 3 – Plano de referência rotacionado em relação ao plano de trabalho
		

Fonte: Autoria própria.

A escolha desta ferramenta é pautada em diversos aspectos, tais como:

- O diâmetro de 2,5mm é um dos maiores dentro do portfólio da Empresa Multinacional, favorecendo a estabilidade da broca durante a furação.
- O furo realizado pela ferramenta possui alta complexidade, favorecendo o interesse em promover melhorias nessa aplicação.
- A broca em questão possui custo elevado e um histórico de grande quantidade de quebras. Desta forma, eventuais ganhos de vida útil mostram-se relevantes.

3.1.3 Máquina-ferramenta

O equipamento que realiza a referida operação dentro da linha de produção da Empresa Multinacional é um centro de usinagem da marca *Retco Maschinenbau*, modelo V377 do ano de 2001. É equipado com comando numérico Siemens, que permite o ajuste dos parâmetros de usinagem e demais controles operacionais. Atualmente é utilizado apenas para a operação avaliada neste trabalho.



Figura 25 - Centro CNC Retco
Fonte: Empresa Multinacional

A máquina é equipada com dois fusos porta ferramentas, permitindo a usinagem de duas peças simultaneamente. A alimentação é manual, ou seja, depende do operador.

O equipamento disponibiliza 2 posições de montagem no castelo (totalizando 4 ferramentas). O sistema de fixação automática da broca utiliza um porta-ferramenta HSK-A-40 (norma DIN 69893); a peça por sua vez é fixada hidraulicamente através de um sistema de placa.

O fluido de corte utilizado é o EcoCut 610B integral mineral, fornecido pela empresa Fuchs. Possui viscosidade nominal de 10 mm²/s a 40°C, segundo o fabricante. Para alimentação, a máquina-ferramenta dispõe de uma bomba de alta pressão de até 150 bar, regulável por válvula hidráulica.

3.1.4 Equipamento para preparação de aresta

O processo de preparação de arestas é realizado no equipamento *Drag Finishing* OTEC, modelo DF-3 Tools, conforme mostrado na Figura 26. Dispõe de 3

eixos rotores acoplados ao eixo árvore, cada um com 6 porta-ferramentas, totalizando uma capacidade de 18 ferramentas por operação.



Figura 26 – Equipamento *Drag Finishing* utilizado

Fonte: otec.de

O sistema é constituído basicamente de 4 módulos:

- a) Estrutura da máquina com suportes para braço principal, eixos rotores e porta-ferramentas
- b) Unidade principal para o braço principal e tomada de força para os eixos rotores e porta-ferramentas
- c) Recipiente para mídia abrasiva
- d) Quadro de distribuição para controle, incluindo *touchscreen*

O equipamento pode ser programado diretamente via *touchscreen* ou através de interface USB. Com os programas é possível programar até dois roteiros de processos diferentes. Para cada um, os parâmetros de profundidade de imersão, tempo e rotação podem ser ajustados independentemente. Neste caso, as velocidades e direções de rotação do braço principal podem ser diferentes dos eixos

rotores, incluindo o porta-ferramenta. As ferramentas são fixadas verticalmente em um mandril e acopladas ao porta-ferramenta. Pinças são utilizadas para fixação adequada e para prevenir que as ferramentas venham eventualmente colidir entre si.

Como abrasivo será utilizado o composto modelo 1/300 de óxido de alumínio e casca de nozes, com densidade de 1,32 kg/l.



Figura 27 - Exemplo de uso da máquina *Drag Finishing* com o abrasivo 1/300
Fonte: Autoria própria

3.2 Descrição da Metodologia

Nesta seção são descritas, de forma detalhada, as etapas da execução do projeto de pesquisa.

3.2.1 Preparação das ferramentas

3.2.1.1 Afição da ferramenta

De acordo com o que é aplicado na Empresa multinacional, a ferramenta fornecida pelo fabricante foi afiada previamente à usinagem. Para tanto utilizou-se uma afiadora CNC de 5 eixos da fabricante Strausak, modelo Strem TGM-106 HD, equipada com um rebolo tipo 12A2, código D46 P C100A do fornecedor Royal Diamond. O tempo médio de afiação para as brocas comumente usadas foi de 6,3

minutos, a partir da segunda ferramenta (desconsidera-se setup e outras eventuais perdas da primeira ferramenta), e o fluido de corte é integral mineral e fornecido pela empresa Fuchs, tipo EcoCut 610B. Detalhes da afiação são representados de maneira ilustrativa na Figura 28. As cotas foram omitidas devido à confidencialidade industrial.

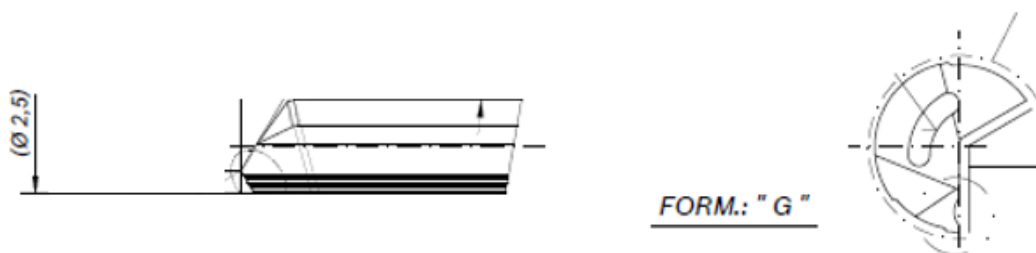


Figura 28 – Afiação da aresta transversal

Fonte: Empresa Multinacional

3.2.1.2 Preparação de arestas

Esta etapa tem como objetivo realizar a proteção de aresta da broca. Foram empregados dois modelos diferentes de preparação de arestas, para futura comparação: processo manual e automático.

3.2.1.2.1 Preparação de arestas manual

Trata-se do método empregado na Empresa Multinacional para a preparação da ferramenta, na data da execução deste trabalho. A abrasão e consequente arredondamento na aresta de corte da ferramenta ocorre pelo contato da mesma com um feltro abrasivo impregnado com uma pasta diamantada. Utiliza-se um equipamento análogo a um moto-esmeril, porém com os rebolos sendo substituídos por discos equipados com o feltro em questão (Figura 29). O equipamento tem giro limitado de 3500 rpm e possui uma chave geral do tipo liga/desliga.



Figura 29 - Equipamento para processo manual de arredondamento.
Fonte: A autoria própria.

O posicionamento da ferramenta ocorre de forma manual, sendo necessário a atuação de um operador. A broca é inclinada a aproximadamente 45° e pressionada contra o disco em rotação. A mesma é movimentada em sentido de vai e vem ao longo do feltro por 10 vezes, totalizando 20 varreduras da região da aresta de corte (Figura 30). O processo dura aproximadamente 1 minuto por ferramenta.



Figura 30 - Execução do processo de arredondamento manual.
Fonte: A autoria própria.

3.2.1.2.2 Preparação de arestas automática

Para esta etapa foi utilizado o equipamento *Drag Finishing* descrito na seção 3.1.4.

Inicialmente buscou-se desenvolver os programas que, quando executados, resultem em um determinado raio de arredondamento de aresta. Estes podem ser obtidos variando-se os parâmetros da máquina, tais como velocidade de rotação do eixo árvore e dos porta-ferramentas, porcentagem do tempo em que o eixo árvore e os porta ferramentas giram nos sentidos horário e anti-horário e profundidade em que a ferramenta é inserida no abrasivo e tempo de processo. Conforme previamente descrito, as direções e velocidades de rotação podem ser controladas independentemente.

Para montagem da ferramenta da máquina utilizou-se um dispositivo conforme a Figura 31. A broca é inserida no mesmo e apenas a região próxima à ponta fica em contato com o abrasivo (detalhe 2). No detalhe 1 pode-se observar a região que é encaixada nos suportes da máquina.

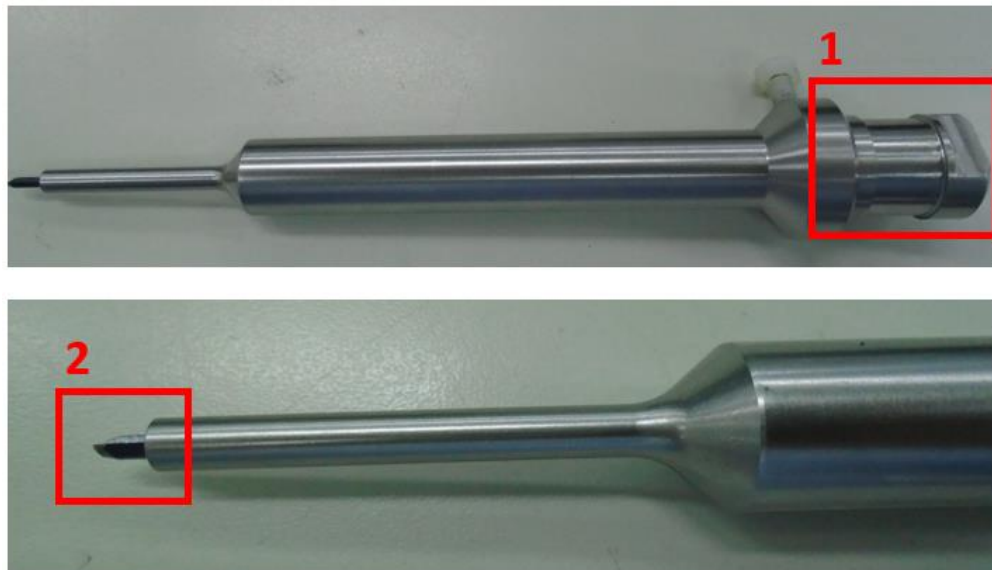


Figura 31 - Dispositivo para broca canhão

Fonte: Autoria própria

Objetivou-se identificar os raios de arredondamento resultantes de tempos de preparação de 5, 10 e 15 minutos e testar essas variações no processo de usinagem, a fim de se obter o tempo ótimo de processo. Apenas uma ferramenta foi

montada por vez na máquina, a um ângulo de 15° em relação à vertical de acordo com a especificação da máquina, conforme Figura 32.



Figura 32 - Ferramenta montada no equipamento *Drag Finishing*

Fonte: Empresa Multinacional

3.2.1.3 Caracterização pré-usinagem

Após as etapas anteriores, as brocas foram caracterizadas seguindo duas abordagens, descritas abaixo.

Inicialmente mediu-se o raio de arredondamento da aresta e da guia em todas as ferramentas, inclusive as somente afiadas, com um rugosímetro modelo Form TalySurf Series 2, do fabricante Taylor Hobson, disponibilizado pela Empresa Multinacional. O equipamento possui uma ponteira 0,5 μm , e o percurso por ela varrido, ao longo das superfícies de saída e folga e da aresta de corte, foi de 0,2 mm.

As ferramentas foram posicionadas a 45° em relação à horizontal através de um prisma magnético do fabricante Mitutoyo (Figura 33), com a ponteira posicionada perpendicularmente à horizontal.



Figura 33 - Posicionamento da ferramenta para medição em rugosímetro.

Fonte: Autoria própria.

O arredondamento foi medido nos pontos mostrados na Figura 34, onde os pontos 1, 2 e 3 são correspondentes à aresta de corte e o ponto 4 à guia.

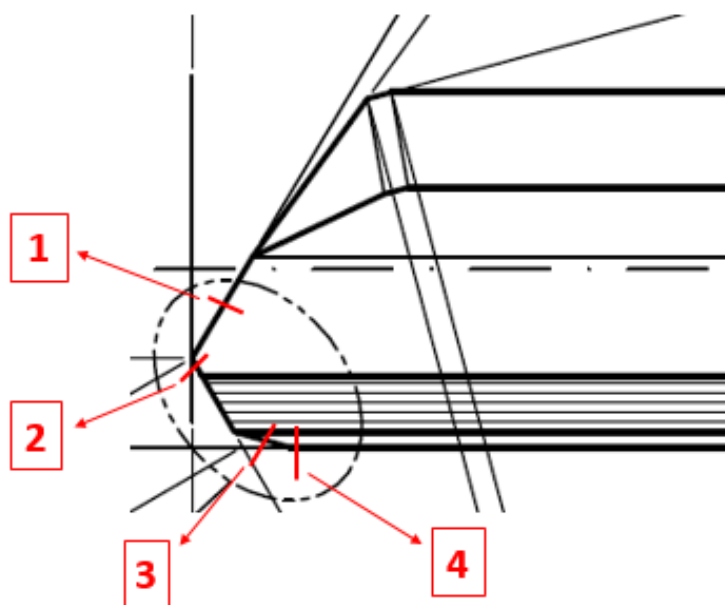


Figura 34 - Pontos de medição do arredondamento

Fonte: Autoria própria

3.2.1.4 Critérios de fim de vida útil da ferramenta

Para estabelecer qual o critério para fim de vida útil da ferramenta neste trabalho, analisou-se o desgaste em brocas preparadas manualmente após 250 peças usinadas, pois esta é a condição atualmente empregada na Empresa Multinacional. Além disso, avaliou-se as condições do furo usinado. Considerou-se as avarias descritas abaixo.

I) Desgaste de cratera

Para avaliar o efeito deste tipo de avaria mediu-se a faixa de distância K_L entre a aresta de corte e o início da cratera em ferramentas após usinagem de 250 peças, estabelecendo o valor obtido como referência. Considerou-se qualquer valor que ultrapasse o mesmo como suficiente para determinar o fim de vida útil da ferramenta.

A medição do desgaste foi realizada com o auxílio do software ImageJ.

II) Sobreposição de superfícies (*Overlapping*)

A presença deste fenômeno em qualquer peça usinada também caracteriza fim de vida útil, devido à criticidade da operação no furo usinado, que é usado na admissão de óleo diesel do porta-injetor. A principal solicitação diz respeito à pressão de injeção do óleo que deve ser suportada pelo material, que gira em torno de 2200 bar.

Conforme anteriormente descrito, o *overlapping* consiste em uma sobreposição de superfícies na parede do furo, conforme demonstrado na Figura 35.

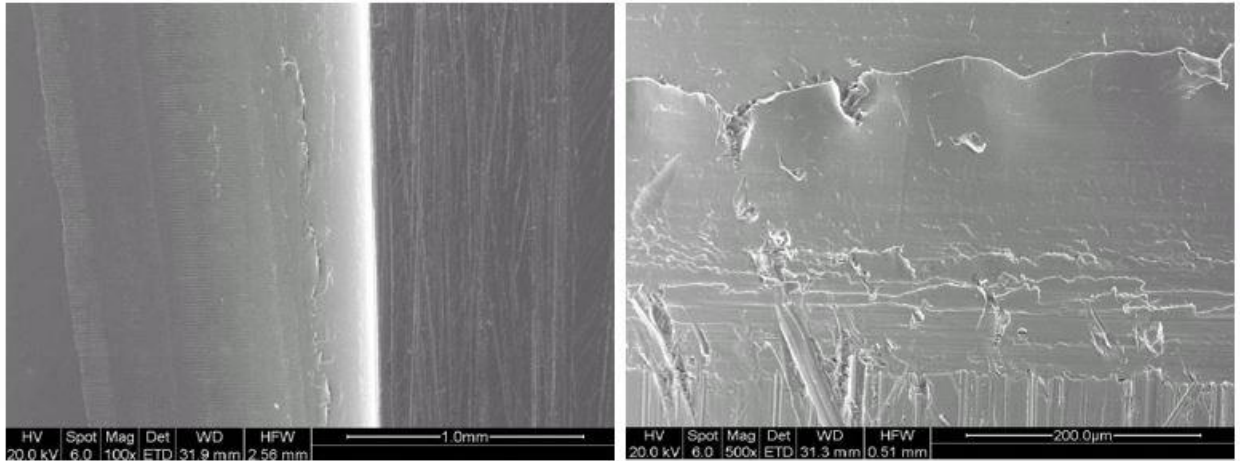


Figura 35 - Exemplos de sobreposição de superfícies em furos de alta pressão. Ampliação de 100 e 500x.

Fonte: Laboratório de materiais da Empresa Multinacional.

Após investigação na Empresa Multinacional, identificou-se que este fenômeno era a principal causa de quebras nos porta-injetores. Isso ocorre devido ao fato de, no ponto onde ocorre a sobreposição de material, ser gerado um concentrador de tensões que propicia o surgimento de trincas, levando à falha do material por fadiga após carregamentos cíclicos referentes aos ciclos de injeção de combustível (Figura 36).

Esta análise foi realizada pelos profissionais da Empresa Multinacional, após vários testes e baseados na experiência sobre o produto e o processo. Por se tratar de uma aplicação específica, bem como um material exclusivo, não se encontra na literatura referências sobre este fenômeno.

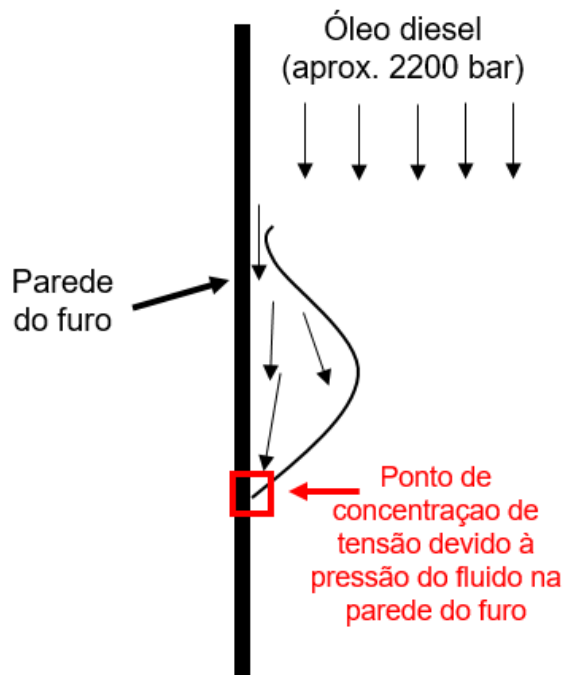


Figura 36 - Concentração de tensões devido à sobreposição de material.

Fonte: Autoria própria.

Finalmente, a fim de se comparar o desgaste nas ferramentas, definiu-se duas abordagens distintas:

- 1) Ensaio de curta duração: usinar com as ferramentas somente afiada, preparada manualmente e preparada automaticamente por 5, 10 e 15 minutos, até que as mesmas atinjam o fim de vida devido à qualidade superficial da peça. Optou-se por este ensaio menor, no qual diversas variáveis são testadas, para não comprometer a aplicação na Empresa Multinacional e evitar um grande número de peças refugadas, visto que a sobreposição de superfícies em um porta-injetor invalida o seu uso.
- 2) Ensaio de longa duração: usinar 250 peças com ferramentas manualmente e automaticamente preparadas. Esta configuração de testes visa identificar um aumento de vida útil na ferramenta, independente das condições do furo usinado, visto o processo pode ser estendido a outras aplicações que não uma tão crítica quanto a usinagem de furos de alta pressão (exemplo: furos de retorno de óleo, que também utilizam furação profunda com brocas canhão).

3.2.1.5 *Planejamento da quantidade de ferramentas*

Previu-se a quantidade de ferramentas novas necessárias para desenvolver o projeto, conforme Tabela 4. Considera-se que cada geometria com aresta arredondada será testada duas vezes na máquina-ferramenta, para garantir a confiabilidade dos resultados.

Tabela 4 - Quantidade de ferramentas novas por etapa

		Caracterização + testes
Afição		2
Arredondamento manual		2
Arredondamento automático	5 min	2
	10 min	2
	15 min	2
Total	10	

Fonte: Autoria própria

Na execução deste trabalho foram utilizadas ferramentas novas, fornecidas pelo fabricante e afiadas uma vez, como é procedimento padrão da empresa.

3.2.2 Usinagem dos corpos de prova

Com as ferramentas devidamente preparadas, realizou-se a furação nos corpos de prova, conforme previamente descrito. Foram mantidas as mesmas condições atualmente empregadas na usinagem do furo em questão, incluindo os parâmetros de corte. Os mesmos não foram alterados devido a limitações dentro dos processos da Empresa Multinacional, considerando que os atuais parâmetros utilizados atendem a uma série de condições necessárias para o funcionamento da linha de produção. Além disso, a não-alteração dos mesmos possibilita uma avaliação mais confiável dos efeitos da preparação de aresta, pois os outros fatores inerentes ao processo permanecem inalterados. Desta forma, um eventual ganho de vida útil pode trazer ganhos financeiros a curto prazo, visto mudanças além do processo de preparação de aresta na ferramenta não são necessárias.

Para a usinagem, a broca foi fixada em um mandril hidráulico de diâmetro igual ao de sua haste, sendo este fixado na máquina ferramenta. Para guiar a ferramenta no início da furação utilizou-se uma bucha de guia, visto que a ferramenta dispõe desse recurso. Desta forma, foi utilizado uma rotação de 7000 RPM e velocidade de

corte de aproximadamente 55 m/min, mantendo-se esses dois parâmetros constantes durante todo o processo. Foi programado para que a ferramenta se aproximasse da peça em avanço rápido a 2 mm do furo, usinando com um avanço de 90 mm/min (0,013 mm/rot) até a profundidade de 10 mm. Na sequência aumentou-se o avanço para 150 mm/min (0,021 mm/rot) até a profundidade de 57 mm e, por fim, reduziu-se novamente o avanço para 90 mm/min até a profundidade de 80 mm. Empregou-se tempo de permanência de 0,5 segundos (equivalente a 58,33 rotações) no final do furo. O retorno foi programado em avanço rápido até 2 mm da face a ser furada.

Uma vedação rotativa de tipo O´ring auxilia a condução do fluido de corte até os canais de refrigeração da ferramenta. Busca-se utilizar a máxima pressão aceitável pela máquina-ferramenta, visto que de acordo com Wosniak (2009), para pressões elevadas ocorre um maior arraste e expulsão do cavaco, diminuindo a chance de haver emaranhamento do mesmo na ferramenta. A pressão nominal nos canais de refrigeração é de 120 bar.

3.2.3 Caracterização do desgaste

Após a usinagem as brocas foram retiradas da máquina-ferramenta para avaliação do estado da aresta de corte. Para avaliação inicial utilizou-se o microscópio convencional anteriormente descrito. Em um segundo momento obteve-se, através de um microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO MA 15 do fabricante Carl Zeiss, a análise visual da aresta de corte, bem como a análise de EDS da mesma. Devido a limitações dimensionais da câmara de vácuo do equipamento foi necessário cortar as brocas a serem avaliadas. Dado o alto custo das ferramentas, optou-se por examinar apenas uma broca para cada geometria, antes e após a usinagem, sendo que dentre os variados raios obtidos por *Drag Finishing* escolheu-se o maior, a fim de evidenciar da melhor maneira a influência do processo. É importante ainda ressaltar que, visto que a broca fica inutilizada após análise no MEV, não é possível avaliar a mesma ferramenta antes e após a usinagem, mas sim diferentes brocas para cada um desses estados. Considerou-se esta tratativa válida para o presente trabalho.

Por fim, para possibilitar a análise de fim de vida devido à problemas na qualidade da peça, realizou-se análise visual em todos os porta-injetores furados por meio de um boroscópio do fabricante Karl Storz, modelo Techno Led Nova SL 150. Ao se verificar um indício de sobreposição de material, caracterizada por marcas evidentes na parede do furo, foi realizada análise do mesmo via MEV, de modo a confirmar a existência desse defeito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os raios de arredondamento na aresta de corte e na guia da broca antes e após a preparação de arestas, bem como a análise da ferramenta após a usinagem.

4.1 Arredondamento antes da preparação de arestas

Na medição em ferramentas somente afiadas, o software utilizado não identificou arredondamento na aresta de corte; um exemplo do relatório pode ser observado na Figura 37. Neste caso sugere-se que, mesmo se houver um raio de arredondamento, o mesmo é tão pequeno a ponto de não ser identificado pelo equipamento.

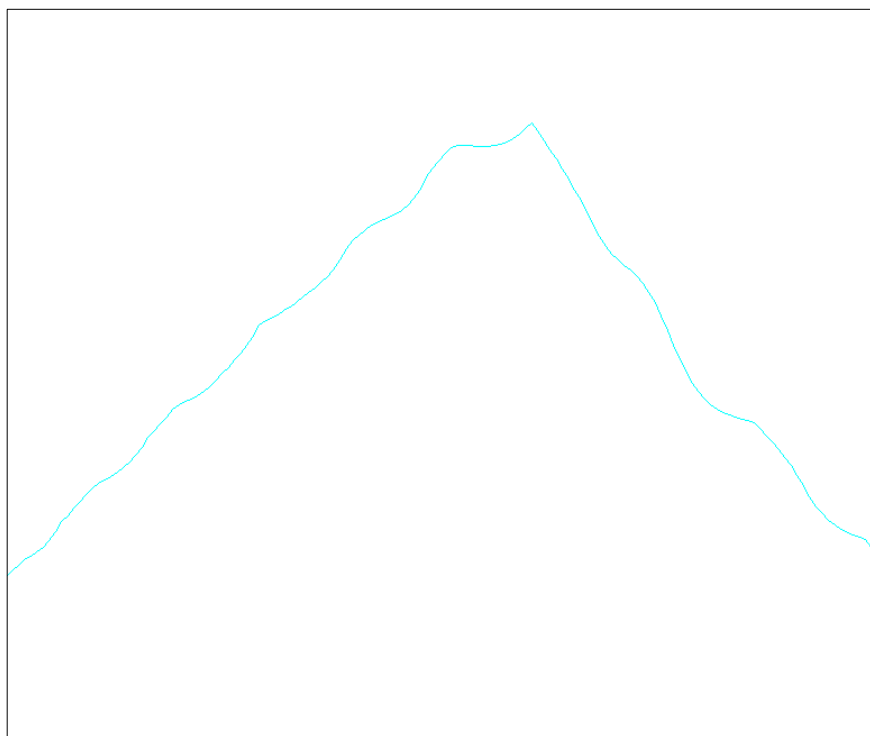


Figura 37 - Perfil da ferramenta afiada sem identificação do raio de arredondamento.

Fonte: Autoria própria

4.2 Estado após preparação de arestas

Na Tabela 5 e Tabela 6 são revelados os raios de arredondamento obtidos após a etapa de proteção de arestas, na aresta de corte e na região da guia próxima à aresta.

Tabela 5 - Raios de arredondamento da aresta de corte

Medição (μm)	Processo manual	Processo automático		
		5 min	10 min	15 min
1	3,8	5,2	10,4	11,1
2	2,9	5,6	9,3	10,4
3	3,5	5,6	10,0	11,0
Valor considerado	3,4	5,4	9,9	10,8

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 38 traz um exemplo do relatório gerado após a medição do arredondamento.

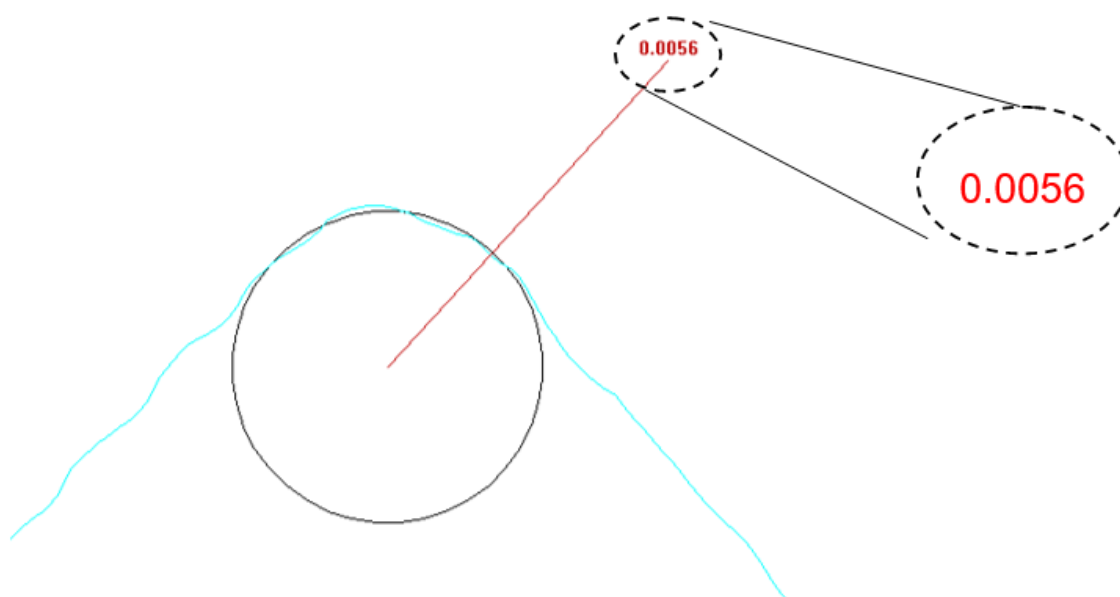


Figura 38 - Exemplo de medição de raio de arredondamento.

Fonte: Autoria própria.

Para as ferramentas com processo manual, o máximo arredondamento obtido foi de 3,8 μm . Este valor pode ser considerado próximo ao obtido após 5 minutos de

processo automático, porém mostra-se 3 vezes menor do que os valores atingidos com os demais tempos de processo.

Considerando o processo automático e comparando os tempos de processo de 5 e 10 minutos, constata-se que, para esta faixa, a relação tempo de máquina x raio de arredondamento na aresta de corte é diretamente e linearmente proporcional. Assim, o dobro do tempo de processo resulta em um arredondamento aproximadamente duas vezes maior. No entanto, comparando-se os processos de 10 e 15 minutos, não há diferença entre os resultados obtidos. Sugere-se que a partir de 10 minutos há estabilização do processo com o abrasivo utilizado.

Tabela 6 - Raio de arredondamento da guia

Medição (μm)	Processo manual	Processo automático		
		5 min	10 min	15 min
1	4,2	10,20	16,75	16,70
2	3,3	10,05	16,20	16,70
3	5,3	10,05	16,75	16,40
Valor considerado	4,26	10,05	16,75	16,70

Fonte: Autoria Própria.

Após análise da Tabela 6 nota-se que para o processo automático, para a guia da ferramenta há um comportamento similar à aresta de corte em termos de arredondamento. Entre os processos de 5 e 10 minutos, a relação é diretamente proporcional, onde mais tempo de processo equivale a um maior arredondamento. No entanto, ao se comparar os processos de 10 e 15 minutos nota-se uma estabilização, ocasionando em raios de mesma magnitude. Além disso, o arredondamento para o processo manual é de menor magnitude.

A Figura 39 compara o estado das ferramentas (a) após afiação, (b) com preparação manual e (c) automática de 15 minutos previamente à usinagem.

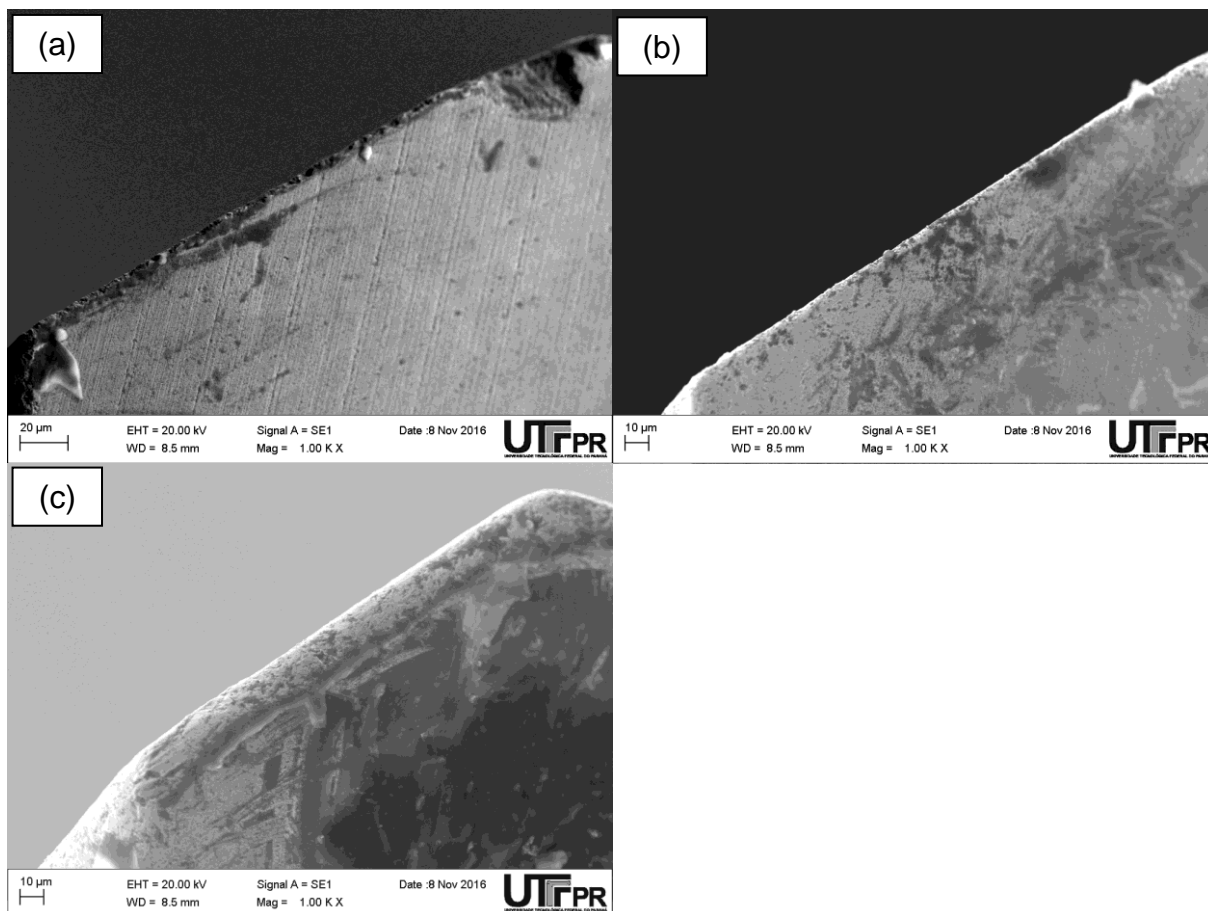


Figura 39 - Comparação entre os estados das ferramentas pré-usinagem.

Fonte: Autoria própria

Há uma evidente diferença entre os 3 estados. Comparando-se as ferramentas afiada e preparada manualmente, nota-se uma uniformização da aresta de corte, com um leve arredondamento. Isso corrobora os resultados obtidos na medição dos arredondamentos, visto que a preparação de arestas manual leva a um sutil aumento no raio, conforme Tabela 5. Analogamente, o mesmo efeito ocorre ao se analisar o estado após o processo automático, havendo aumento em magnitude e uniformidade do raio.

A Figura 40 mostra as mesmas ferramentas com menor ampliação.

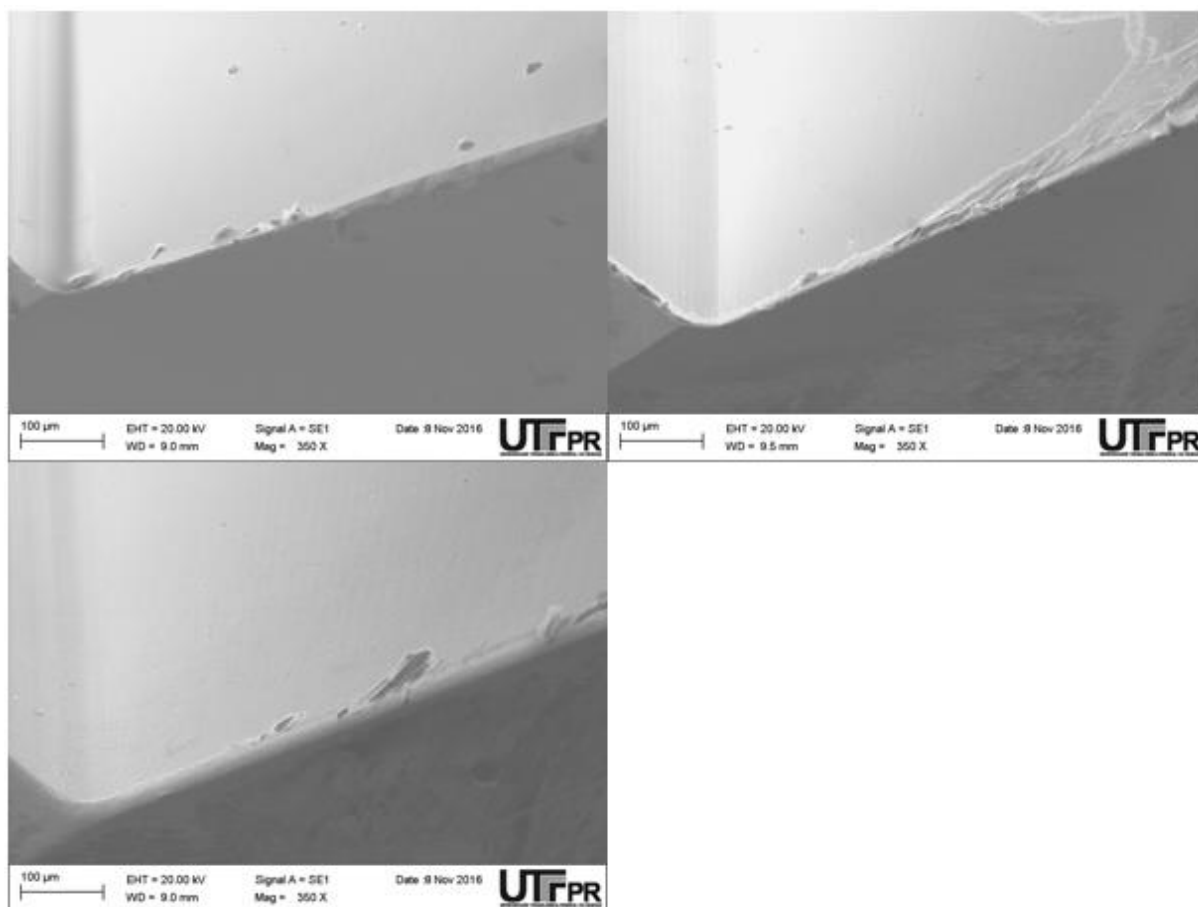
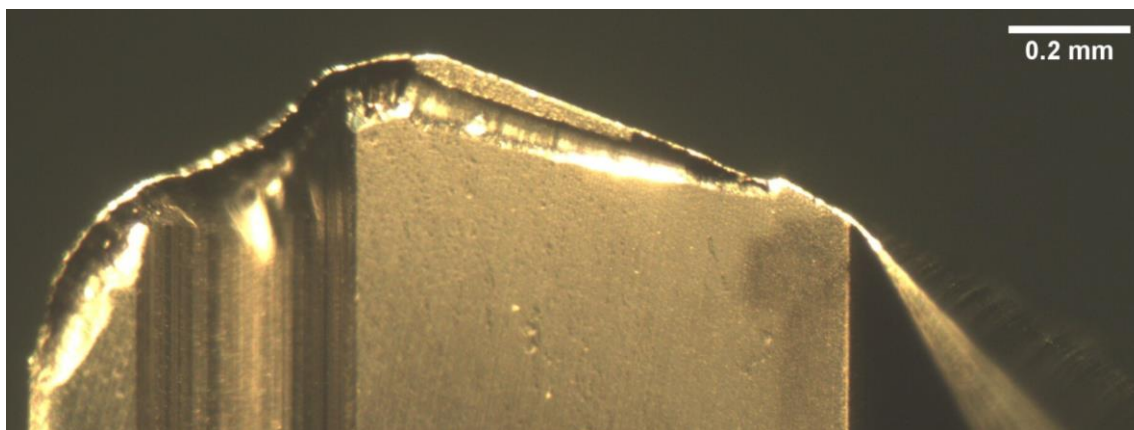


Figura 40 - Ferramentas pré-usinagem com ampliação de 350x.
Fonte: Autoria própria.

4.3 Especificação do critério de fim de vida

Seguindo as duas abordagens para definir o fim de vida útil, observa-se na Figura 41 que a ferramenta após usinagem de 250 peças está na iminência do colapso, visto que a distância K_L entre o início da cratera e a aresta de corte é muito pequena; mediu-se o valor de 8 µm. Neste caso falta pouco para que a cratera encontre o flanco da ferramenta, passando pela aresta de corte e inviabilizando a mesma.



**Figura 41 – Ferramenta na iminência do colapso até usinagem de 250 peças.
Fonte: Aatoria própria**

Desta forma, confirma-se adequado o número de 250 peças, que é empregado na Empresa Multinacional, como referência para a vida útil da ferramenta. Neste caso o comprimento total usinado é de 18,4 m.

Olhando pelo lado da qualidade superficial da peça, o Gráfico 3 revela, para cada ferramenta, em qual peça observou-se pela primeira vez indícios de sobreposição de material, após análise visual. No caso do processo com arredondamento manual não ocorre o problema de sobreposição de material.

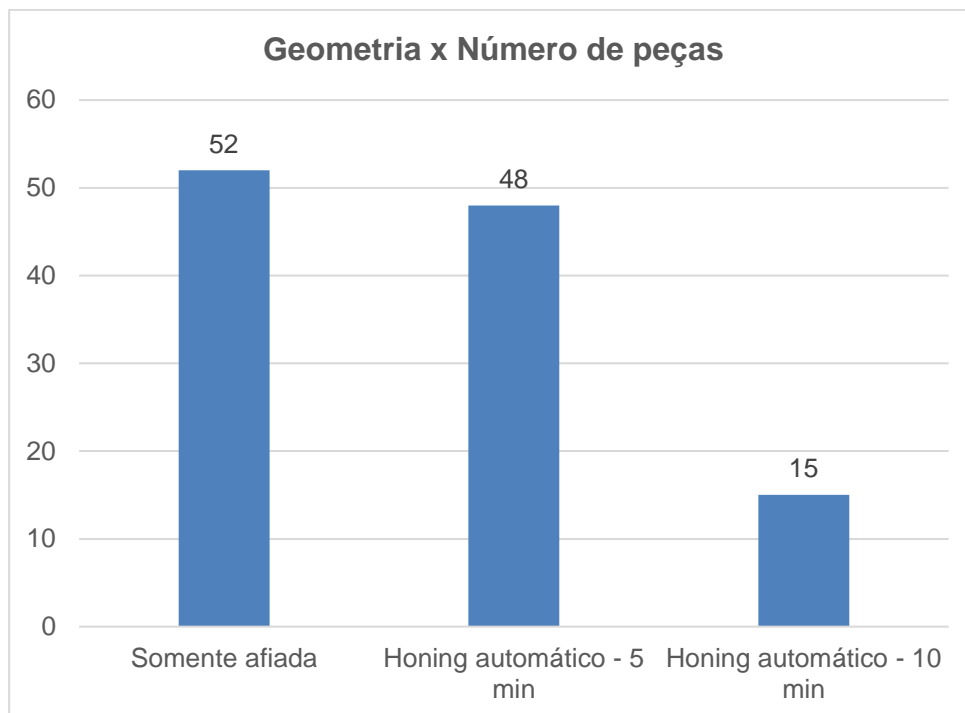


Gráfico 3 - Geometria da ferramenta x número de peças para *overlapping*.

Fonte: Autoria própria.

Considerando os resultados obtidos e buscando padronizar o número de peças para posterior comparação do desgaste, optou-se por usinar no máximo 50 peças e definir como critério de fim de vida o acabamento superficial da peça, o que corresponde a um comprimento usinado de 3,7 m. A ferramenta preparada manualmente não apresentou sobreposição de superfícies em nenhuma peça usinada.

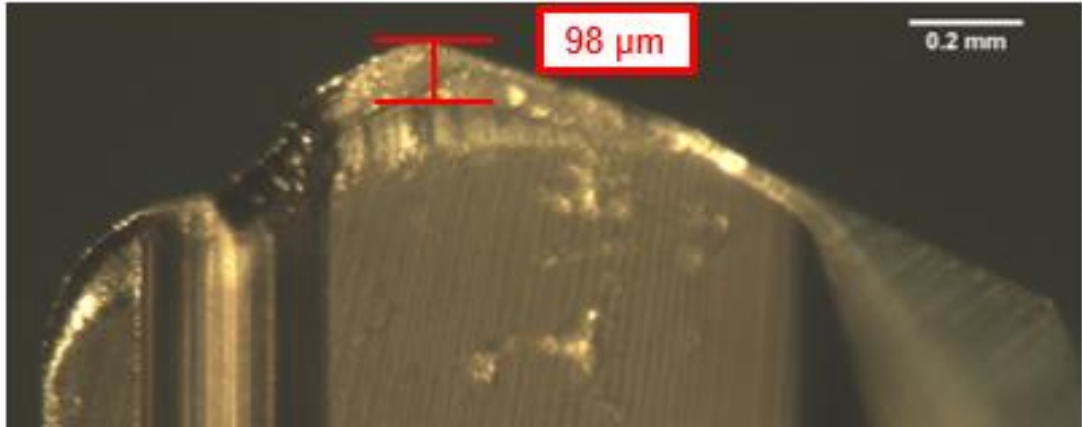
Visto que para a ferramenta preparada automaticamente por 10 minutos o *overlapping* ocorreu muito cedo para fins de comparação com as outras geometrias, optou-se por desconsiderar esse estado. Dado que o raio obtido para as ferramentas de 10 e 15 minutos é o mesmo, optou-se por analisar mais a fundo apenas a segunda configuração.

4.4 Estado da ferramenta após usinagem de 50 peças (3,7 m)

O estado das brocas após a furação é demonstrado a seguir.

4.4.1 Ferramenta somente afiada

A Figura 42 revela o estado das ferramentas somente afiadas após a usinagem, visto sobre a superfície de saída no plano de referência.



**Figura 42 - Ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças (3,7 m).
Ampliação de 146x.**

Fonte: Autoria própria

Nota-se um desgaste elevado na região de encontro entre o fim da guia e o início da aresta de corte, na forma de um arredondamento na região chanfrada. A menor distância KL medida foi de 98 µm.

Considerando o plano de trabalho convencional (Pf) (Figura 43), não há desgaste de flanco perceptível na ampliação utilizada.

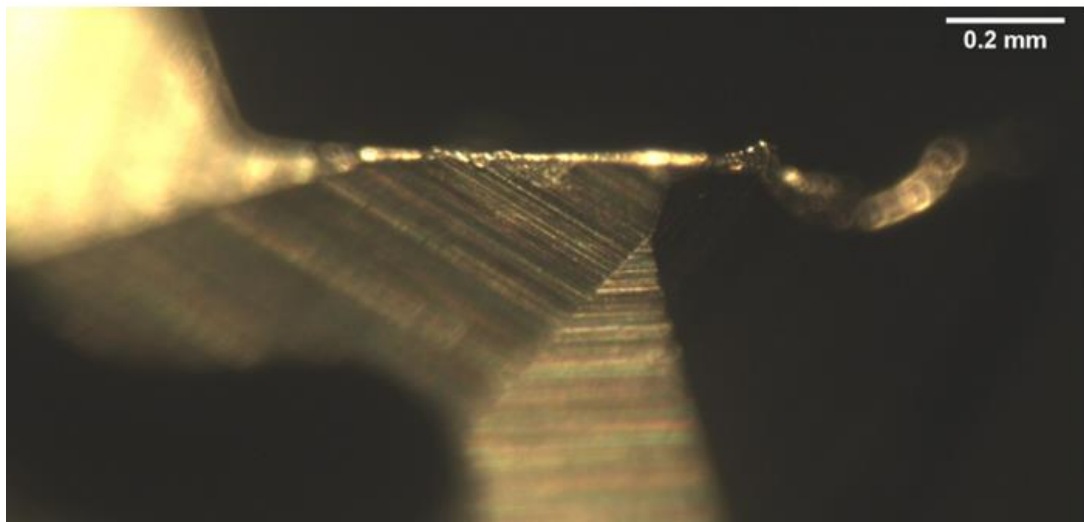


Figura 43 - Ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças (3,7 m) - vista de topo. Ampliação de 146x.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 revela o estado da aresta de corte após análise via MEV.

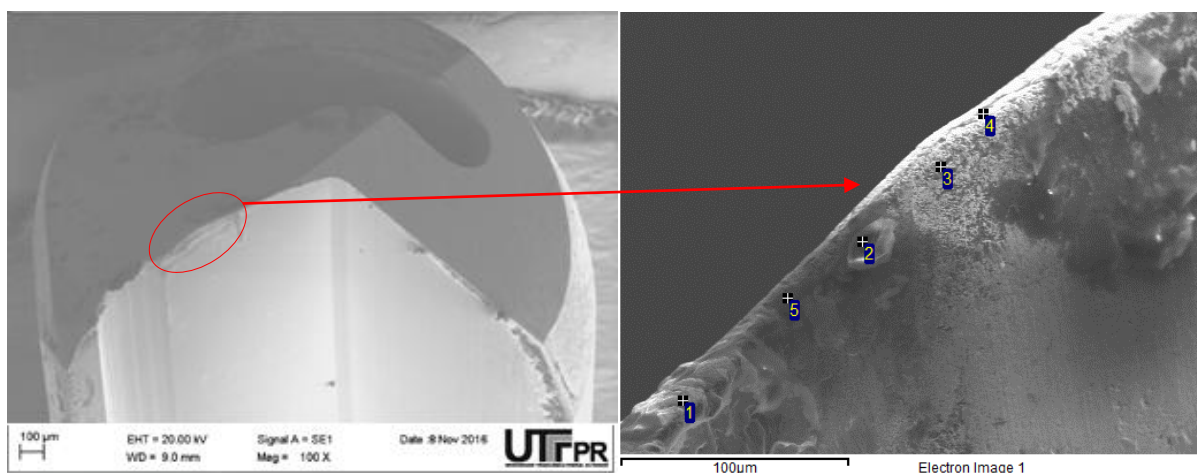


Figura 44 – Aresta de corte da ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças

Fonte: Autoria própria

Nota-se uma deformação plástica considerável na aresta de corte após a usinagem. Além disso há notáveis alterações ao longo da superfície de saída.

A Tabela 7 mostra os componentes químicos presentes na aresta da ferramenta pós-usinagem, após análise de EDS.

Tabela 7 - Composição química da região da aresta de corte da ferramenta somente afiada após usinagem de 50 peças

T2	C	O	Na	S	Cl	Ca	Cr	Co	W	Si	Mn	Fe	K
1	18.16						1.06			0.44	0.78	79.56	
2	61.22	31.63	1.12	1.42	0.70	0.34			2.88			0.28	0.40
3	23.71	3.96	0.37		0.37		0.30	5.06	64.69			1.54	
4	16.82	3.04		0.43			0.47	4.89	64.11			10.25	
5	49.08	9.84	0.50	0.19	0.46	1.13	0.22	2.39	34.72			1.47	
Max.	61.22	31.63	1.12	1.42	0.70	1.13	1.06	5.06	64.69	0.44	0.78	79.56	0.40
Min.	16.82	3.04	0.37	0.19	0.37	0.34	0.22	2.39	2.88	0.44	0.78	0.28	0.40

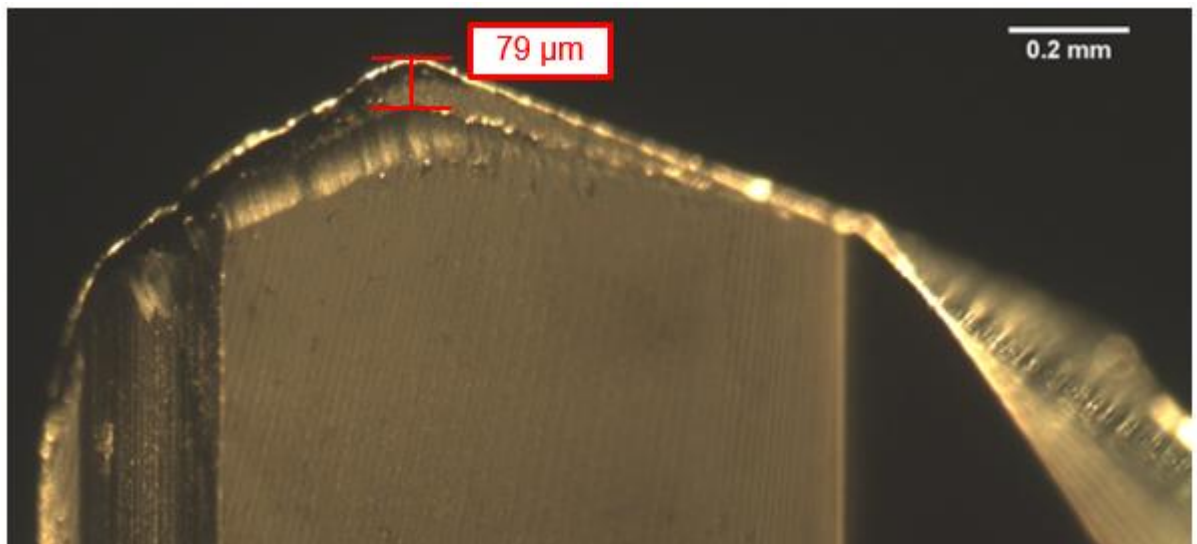
Todos os resultados em massa %

Fonte: Autoria própria

Destaca-se a elevada presença de Ferro no ponto 1 próximo ao início do quebra cavaco, confirmando que houve adesão do material da peça. O mesmo ocorre para o ponto 4, porém em menor quantidade. No ponto 2 há elevada presença de carbono, o que denota não haver adesão significativa do material da peça e pode indicar oxidação ou algum tipo contaminação. Para os demais pontos há presença de carbono e grande concentração de tungstênio, o que é esperado para ferramentas de metal duro.

4.4.2 Ferramenta após arredondamento manual

O estado da ferramenta pode ser observado na Figura 45. A distância K_L foi de 79 μm .



**Figura 45 - Ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 50 peças.
Ampliação de 146x.**

Fonte: Autoria própria

A análise da ferramenta após arredondamento manual utilizando o MEV, conforme Figura 46, mostra uma deformação plástica menor na aresta de corte após a usinagem quando comparada com a ferramenta sem arredondamento, ou seja, somente afiada.

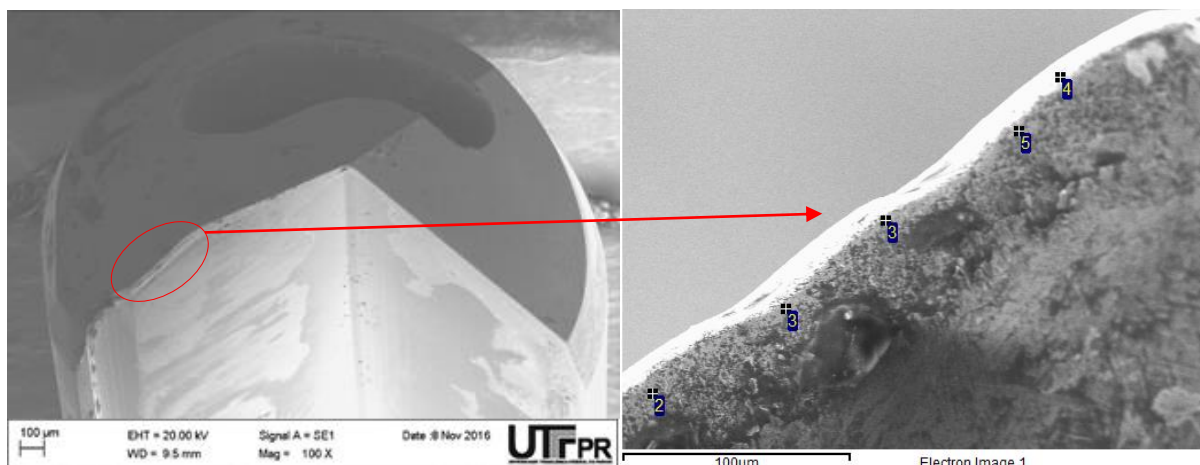


Figura 46 - Aresta de corte da ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 50 peças

Fonte: Autoria própria

A Tabela 8, gerada pelo MEV, mostra os componentes químicos presentes na aresta da ferramenta após a usinagem. Nota-se que há uma variação desses componentes. Há presença de ferro em alguns pontos, confirmando que houve a adesão do material da peça, porém menor quando comparado à ferramenta sem arredondamento.

Tabela 8 - Composição química da região da aresta de corte da ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 50 peças

T4	C	O	Al	Cl	Cr	Fe	Co	W
2	9.38	1.23			1.68	9.06	25.11	53.55
3	12.45	2.97		0.30	0.66	15.26	2.20	66.17
3	10.03	1.14				0.85	7.59	80.40
4	10.20	2.10	2.77			12.77	45.57	26.59
5	6.85	2.17			0.56	3.79	13.85	72.78
Max.	12.45	2.97	2.77	0.30	1.68	15.26	45.57	80.40
Min.	6.85	1.14	2.77	0.30	0.56	0.85	2.20	26.59

Todos os resultados em massa %

Fonte: Autoria própria

4.4.3 Ferramenta após arredondamento automático de 15 minutos

A Figura 47 mostra o estado da ferramenta, com uma distância K_L de 84 μm .

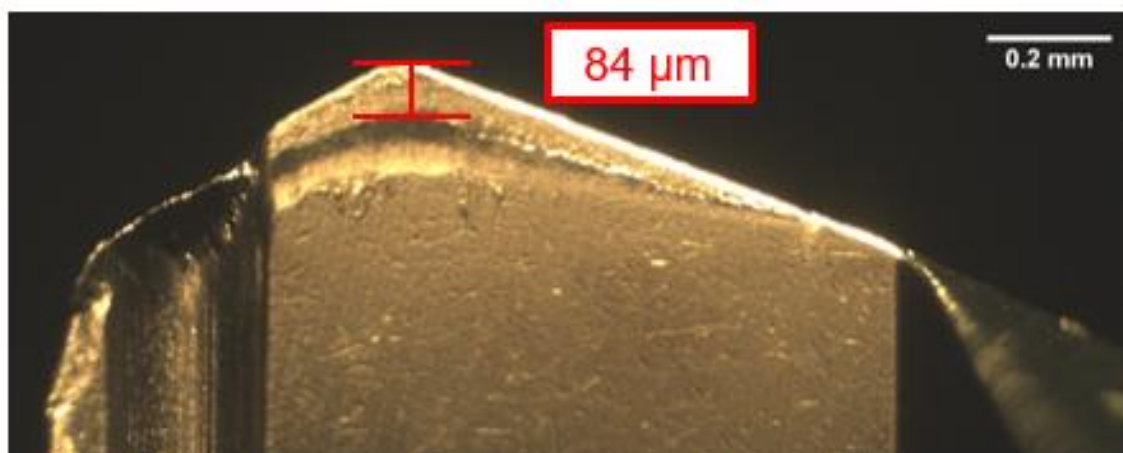


Figura 47 - Ferramenta com arredondamento automático de 15 minutos após usinagem de 50 peças. Ampliação de 146x.

Fonte: Autoria própria.

Por fim também foi realizada a análise da ferramenta após arredondamento automático de 15 minutos utilizando o MEV. Conforme a Figura 48, praticamente não há deformação plástica na aresta de corte quando comparada com a ferramenta com preparada manualmente. Com isso nota-se que a região da aresta de corte da ferramenta permaneceu geometricamente uniforme.

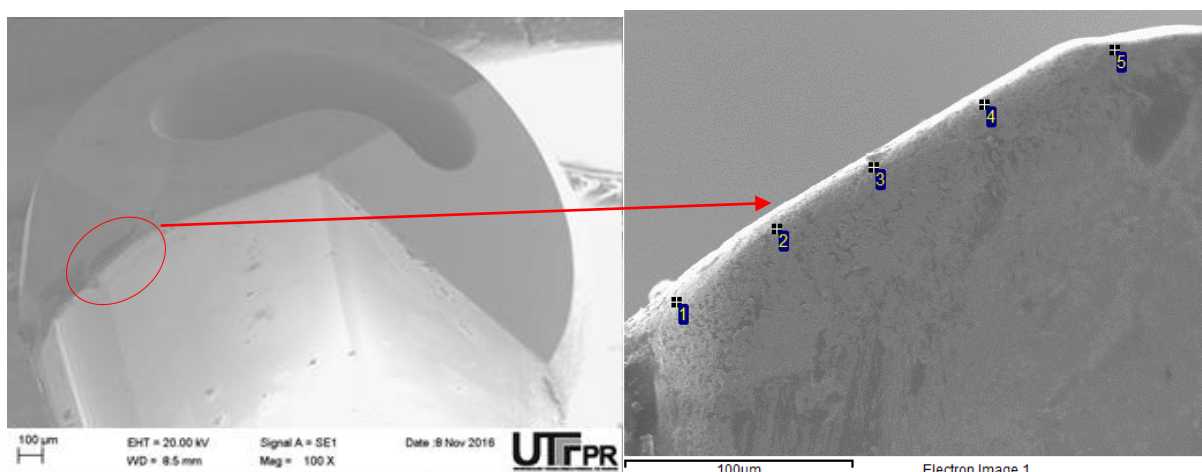


Figura 48 - Aresta de corte da ferramenta após arredondamento automático e usinagem de 50 peças

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9 mostra os componentes químicos presentes na aresta da ferramenta após a usinagem. Nota-se que há uma variação desses componentes. Há maior presença de ferro nos pontos 1 e 5, que são na região do quebra-cavaco e na ponta da ferramenta respectivamente. Isso confirma que houve adesão do material da peça, porém menor quando comparado à ferramenta com arredondamento de aresta manual.

Tabela 9 - Composição química da região da aresta de corte da ferramenta após arredondamento automático de 15 minutos e usinagem de 50 peças

T6	C	O	Na	S	Cl	Cr	Fe	Co	Ni	W
1	13.48	1.55		0.30		0.95	17.23	14.41		52.09
2	10.25	2.00					1.35	2.09		84.31
3	24.05	4.29	1.14	1.11	0.34	0.51	3.78	13.74		51.04
4	11.66	1.84				0.85	3.39	15.31		66.94
5	18.67	3.17	0.47	0.37		5.99	24.74	7.87	2.79	35.93
Max.	24.05	4.29	1.14	1.11	0.34	5.99	24.74	15.31	2.79	84.31
Min.	10.25	1.55	0.47	0.30	0.34	0.51	1.35	2.09	2.79	35.93

Todos os resultados em massa %

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a superfície de saída das ferramentas, na região próxima à aresta de corte, é possível notar a diferença de desgaste nas 3 configurações estudadas, sendo que a ferramenta apenas afiada é a que apresenta maior número de imperfeições, e a broca preparada automaticamente apresenta a melhor condição após a usinagem.

4.5 Estado após usinagem de 250 peças (18,4 m)

4.5.1 Ferramenta após preparação de arestas manual

Na Figura 41 pode-se observar o estado da ferramenta. Nota-se desgaste de cratera ao longo de praticamente toda a superfície de saída. Conforme mencionado, a distância KL foi de aproximadamente 8 μm .

A Figura 49 revela a mesma ferramenta sob a vista de topo. Nesta configuração há presença de desgaste de flanco, bem como formação de aresta postiça próximo ao centro da broca.

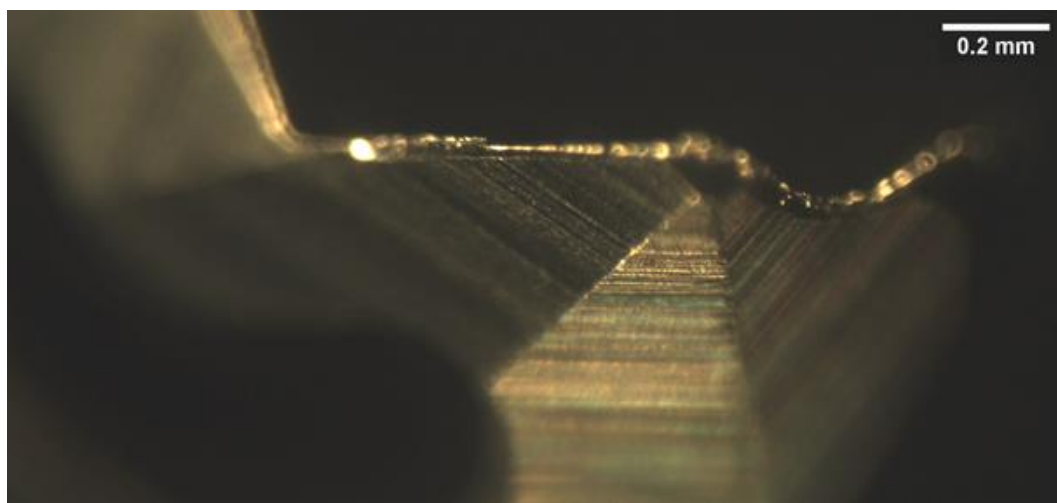


Figura 49 - Ferramenta após arredondamento manual e usinagem de 250 peças - vista de topo. Ampliação de 146x.

4.5.2 Ferramenta após arredondamento automático de 10 minutos

Na Figura 50 nota-se, analogamente à broca preparada manualmente, presença de desgaste de flanco. No entanto, não se nota formação de aresta postiça, mas uma posterior e mais aprofundada análise deve ser feita para confirmar a ausência da aresta postiça.

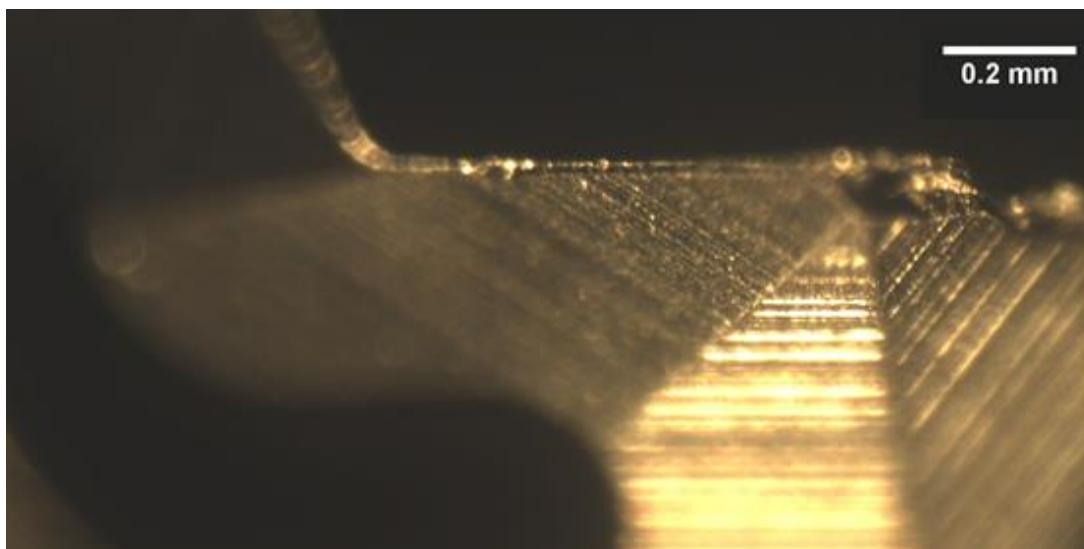


Figura 50 - Desgaste em broca com arredondamento automático de 10 minutos (vista de topo). Ampliação de 146x.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 51 é demonstrado o desgaste na superfície de saída.

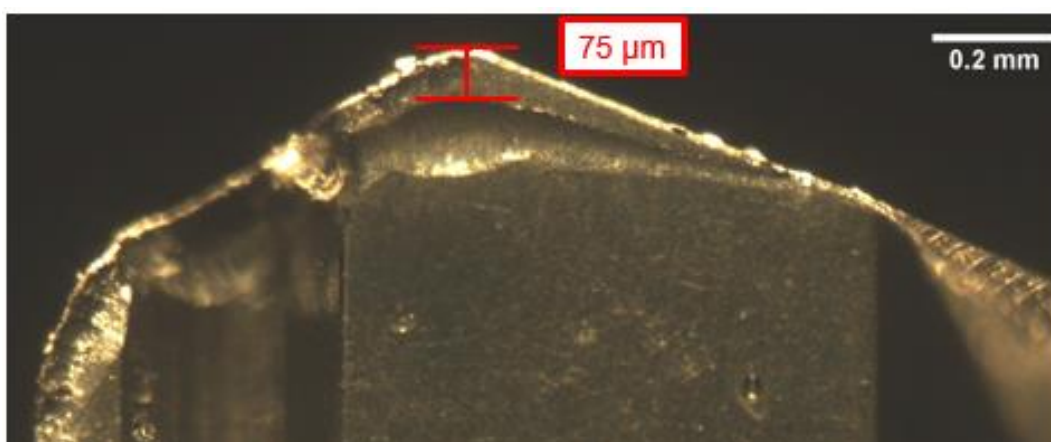


Figura 51 - Desgaste em broca com arredondamento automático de 10 minutos (vista da superfície de saída) – Ampliação de 146x.

Fonte: Autoria própria.

Analogamente à ferramenta com preparação manual, há desgaste de cratera ao longo de toda a superfície de saída. No entanto, a distância K_L medida é bem menor: 75 μm .

A Tabela 10 resume os valores de K_L encontrados.

Tabela 10 - Valores de KL para cada geometria.

Após 3,7 m usinados	
Geometria	KL (μm)
Somente afiada	98
Arredondamento manual	79
Arredondamento automático - 15 min	84
Após 18,4 m usinados	
Geometria	KL (μm)
Arredondamento manual	8
Arredondamento automático - 10 min	75

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, sugere-se que, para a aplicação estudada, a preparação automática de arestas leva a um menor desgaste de cratera na ferramenta, em comparação com o processo manual, o que configura um aumento de vida útil.

4.6 Análise da superfície usinada.

A Figura 52 mostra as condições do furo usinado com ferramenta preparada automaticamente por 5 minutos, após análise no MEV.

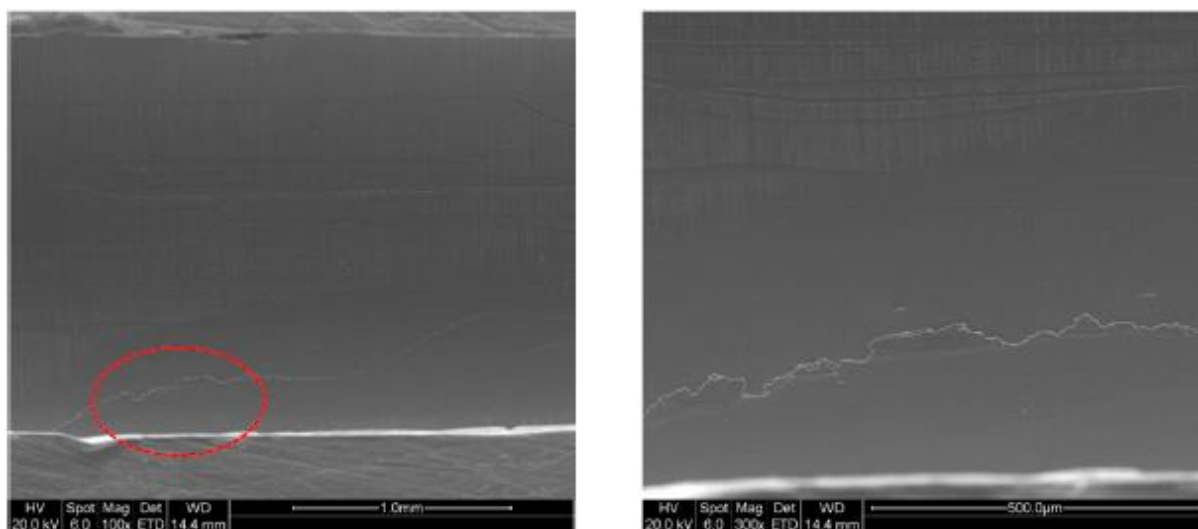


Figura 52 – Análise do furo usinado com ferramenta após preparação automática de arestas.

Fonte: Empresa Multinacional

Nota-se a presença de sobreposição de material ao longo de toda a região analisada (que, neste caso, trata-se da região de saída do furo). Após análise crítica no laboratório de materiais da Empresa Multinacional, constatou-se é configurada a condição de sobreposição de material.

Conforme sugerido por Biermann (2012), para baixas taxas de avanço em relação ao tamanho do raio de aresta, um aumento no arredondamento da mesma gera ângulos de saída negativos, conforme evidenciado na Figura 53, ocasionando um efeito no qual a maior parte do material da peça que está na frente da aresta de corte é pressionada contra a área de formação do cavaco, enquanto uma pequena quantidade do material é pressionada contra a superfície da peça. Isto leva a uma alta deformação plástica na peça, afetando características como a qualidade superficial da mesma.

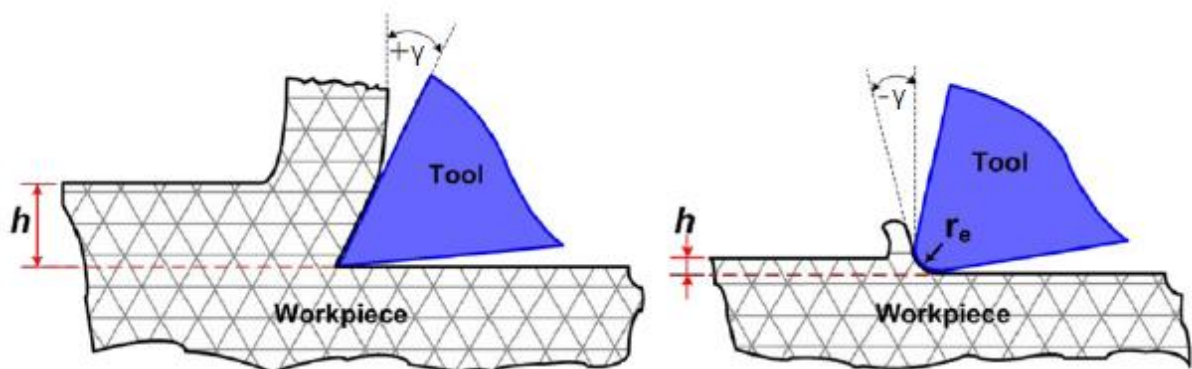


Figura 53 - Ângulos de saída negativos gerados pelo arredondamento na aresta de corte.

Fonte: Aramcharoen et al., 2008.

Neste caso, sugere-se que a sobreposição de material ocorre devido à deformação plástica ocasionada por tal efeito, visto que na operação estudada o menor avanço é de 0,013 mm/rot, ou seja, menor que os raios de arredondamento obtidos após os processos automáticos de arredondamento de 10 e 15 minutos. Corroborando para possível causa do problema, de acordo também com Imran (2012), usar um avanço mais baixo do que o raio de arredondamento poder levar a ângulos de saída negativos em demasia e consequentemente deformação plástica elevada durante a furação.

Além disso, considera-se também a hipótese de ter havido caldeamento do material da peça. Segundo Nicola et al., (2010), uma porção do material desse material pode deslizar entre a peça e o flanco da ferramenta, devido ao escoamento de cavaco na usinagem. Sugere-se que o arredondamento gerado na guia após a preparação automática de arestas libera mais espaço para a passagem do cavaco, facilitando a condição mencionada. Com as temperaturas geradas durante o corte diminui-se a resistência mecânica do material, levando o mesmo a plastificar sobre a superfície e ser comprimido contra a mesma. O resultado é a presença de material micro caldeado, sendo o fenômeno comumente chamado de caldeamento.

Desta forma, sugere-se que a ferramenta preparada manualmente não gera sobreposição de superfícies na peça usinada devido ao menor arredondamento existente na região de guia da ferramenta. Isto ocorre devido ao fato de, no processo *Drag Finishing*, não ser possível evitar o contato da guia com o abrasivo, ao contrário do processo manual, no qual é possível direcionar a ferramenta de modo a apenas a aresta de corte entrar em contato com o feltro abrasivo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

5.1.1 Quanto ao processo automático *Drag Finishing*

- Na aresta de corte e para um tempo de processo de até 10 minutos, a relação tempo de processo x raio de arredondamento é diretamente e linearmente proporcional.
- Na região da guia o mecanismo de arredondamento é análogo ao da região de aresta, sendo diretamente, porém não linearmente proporcional.
- No processo *Drag Finishing*, a partir de 10 minutos o processo estabiliza e não há grandes diferenças em termos de arredondamento, tanto na aresta de corte quanto na guia.

5.1.2 Quanto à influência do arredondamento

- Em caso da usinagem de 250 peças, o processo *Drag Finishing* leva a um aumento de vida útil da ferramenta, em comparação ao processo de preparação manual. A melhoria ocorre pela diminuição do desgaste de cratera da ferramenta.
- Em termos de uniformidade e deformações plásticas na aresta de corte, o processo *Drag Finishing* gera melhores resultados em comparação ao processo manual, que por sua vez é se mostra mais efetivo do que a simples afiação.
- Em termos da qualidade superficial da peça, o arredondamento na região gerado pelo processo *Drag Finishing* leva à sobreposição de superfícies na parede do furo. A ferramenta manualmente preparada não apresenta este efeito pois suspeita-se que é possível direcionar o arredondamento à região localizada da aresta de corte.

Em relação ao desgaste de cratera, tanto o arredondamento manual quanto o automático aumentam a vida útil devido à melhora na estabilidade da aresta de corte, reforçando a ferramenta, mas sem perder a força de corte. Entretanto, quando se considera a qualidade superficial da peça, somente com o arredondamento manual há um aumento na vida útil, visto que com o arredondamento automático também surge a sobreposição de superfícies como na ferramenta sem arredondamento.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar, via MEV e EDS, os efeitos de diferentes raios obtidos no processo *Drag Finishing* após a usinagem.
- Investigar os efeitos da aplicação de revestimentos, aliados ao arredondamento de aresta, no desgaste de ferramentas e qualidade superficial da peça.
- Investigar com o devido aprofundamento a causa do problema de sobreposição de material em ferramentas sem arredondamento.
- Analisar a influência da relação taxa de avanço x raio de arredondamento de aresta obtido pelo processo automático.

REFERÊNCIAS

- ABELE, E., ELLERMEIER, A., HOHENSTEIN, J., TSCHANNERL, M. **Tool length influence on wear behaviour of twisted carbide drills**. German Academic Society for Production Engineering (WGP) – Prod. Eng. Res. Devel., 2007, p.51-56.
- ARAMCHAROEN, A; MATIVENGA, P. T.; YANG, S.; COOKE, K. E.; TEER, D.G.; Evaluation and selection of hard coatings for micro drilling of hardened tool steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture 48**. Londres, 2008, p.1579.
- ASTAKHOV, V. P., GALITSKY, V. V. Tool life testing in gundrilling: an application of the group method of data handling (GMDH). **International Journal of Machine Tools & Manufacture 45**. Astakhov Tool Service, 2005.
- BANAKH, O., SCHMID, P. E., SANJINÉS, R., LÉVY, F. **High-temperature oxidation resistance of Cr_{1-x}Al_xN thin films deposited by reactive magnetron sputtering**. Suíça: EPFL, 2003, p. 57–61
- BIERMANN, D., HEILMANNA, M., KIRSCHNERA, M. **Analysis of the Influence of Tool Geometry on Surface Integrity in Single-lip Deep Hole Drilling with Small Diameters**. Institute of Machining Technology, Universidade Técnica de Dortmund, Dortmund, 2011.
- BIERMANN, D., KIRSCHNER, M. Experimental investigations on single-lip deep hole drilling of superalloy Inconel 718 with small diameters. **Journal of Manufacturing Processes**. Institute of Machining Technology, Universidade Técnica de Dortmund, Dortmund, v. 20, p. 332–339, Outubro 2015.
- BIERMANN, D., TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC process. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 1**, p. 76-80, 2008.
- BIERMANN, D., WOLF, M., AßMUTH, R. Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills. **5th CIRP Conference on High Performance Cutting**, p. 01-04, 2012.
- BLON, M. **Erzeugung von Schneidkantenverrundungen bei Wendelbohrern durch Bürsten und Schleppscheiben und deren Einflüsse**. 2015. 65 f.

Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Berufsakademie Saarland, Zum Eisenwerk, p. 20-31, 2015.

BOOKER, J.D., SWIFT, K. G. **Seleção de processos de manufatura**. 1. ed. Elsevir, 2014.

BOOTHROYD, G., KNIGHT, W. A. **Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools**. 3.ed. Kingstown: CRC Press, 2005, p. 144.

BORK, C. A. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. USFC. Florianópolis, 1995.

BOTEK. **Einlippenbohrer: Typ 110, 113**. Catálogo do fabricante de broca canhão. Disponível em: <<http://www.botek.de/downloads/kataloge/einlippenbohrer-typ-110>>. Acesso em: 23 março 2016.

BOTEK. **Formblatt für Anfrage oder Bestellung von EINLIPPENBOHRERN (Einschneider)**. Catálogo do fabricante de broca canhão. Disponível em: <<http://www.botek.de/downloads/kataloge/bestellung-anfrage>>. Acesso em: 23 março 2016.

BOUZAKIS, K. D., MICHAILEDIS, N., SKORDARIS, G., KOMBOGIANNIS, S., HADJIYIANNIS, S., EFSTATHIOU, K., PAVLIDOU, E., ERKENS, G., RAMBADT, S., WIRTH, I. **Optimization of the cutting edge roundness and its manufacturing procedures of cemented carbide inserts, to improve their milling performance after a PVD coating deposition**. Surface and Coatings Technology. Vol. 163-164. 2003, p. 625-630.

BUNSHAH R. F. **Handbook of hard coatings: depositions technologies, properties and applications**. New Jersey: Noyes Publications, 2001, 550 p.

BYRNE, G., DORNFELD, D., DENKENA, B. **Advancing cutting technology**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, 2003, p. 483-507.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5ª Ed., J. Wiley, Nova York, 2000.

CARDOSO, M. J. **Análise do processo de furação profunda no aço SAE 4144m endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida**. 2014. 135 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Manufatura) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CASTILLO, W. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal Duro com Canais Retos**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101938>>. Acesso em: 03 dez. 2016.

CHEUNG, F.Y., ZHOU, Z.F., GEDDAM, A., LI, K.Y. Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills. **Journal of Materials Processing Technology 208**: China, 2008, p. 196-204.

DENKENA, B., LUCAS, A., BASSETT, E. **Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermos-mechanical load**. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60: 2011, p. 73-76.

DENKENA, B., KOEHLER, J., REHE, M. **Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel**. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, Alemanha, 2012, p. 190-195.

DINIZ, A., MARCONDES, F., COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5. ed., São Paulo: Artliber Editora LTDA., 2006.

EICHLER, R. **Prozesssicherheit beim Einlippenbohren mit kleinsten Durchmessern**. Universidade de Stuttgart, Stuttgart, 1996, ISSN: 0943-3821

FANG, N.; WU, Q. **The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 45. 2005. p. 1178-1187.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Bluecher LTDA., 1970.

GEGENHEIMER, H. Präparationsverfahren: Gleitschleppscheifen. Dentro de: F. Tikal, **Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden**. Universidade de Kassel, Kassel, 2009. p. 98-118

GROTE, K. H., ANTONSSON, E. K. **Handbook of Mechanical Engineering**. Vol. 10. Editora Springer, 2009. p. 619.

HOLZKNECHT, E. **Drag Finishing: Surface Finishing of Delicate Parts**. Production Machining Magazine, 2009. Disponível em: <<http://www.productionmachining.com/articles/drag-finishing-surface-finishing-of-delicate-parts>>. Acesso em: 21 set. 2016.

IMRAN, M., MATIVENGA, P. T. Assessment of machining performance using the wear map approach in micro-drilling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Londres, 2012, p. 119–126.

JUNG, J., KE, F. A gun drilling force system. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 47. China, 2006, p. 1276–1284.

KLOCKE, F. **Manufacturing Process 1 – Cutting**. Alemanha: Editora Springer, 2011.

KLOCKE, Fritz; KRIEG, T. **Coated Tools for Metal Cutting-Features and Applications**. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. Aachen, 1999, p. 515-525.

KOEHLER, W. Analysis of the High Performance Drilling Process: Influence of Shape and Profile of the Cutting Edge of Twist Drills. Transactions of ASME. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. Vol. 130, 5. Ed., 2008.

KOENIG, W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren**. Aachen: Editora Springer. 5ª edição, 1997.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. Tese de Doutorado, Uberlândia, 1998.

MARMENTINI, M. BELTRÃO, P. C. **Análise comparativa do desempenho de brocas helicoidais revestidas com TiAlN e AlCr na furação do aço SAE 4144 beneficiado**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação, 4 f, Águas de São Pedro, SP, 2007. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

METAL FINISHING SUPPLIERS' ASSOCIATION. **Quality metal finishing guide – Mass finishing**. Vol. 1-A, nº7. Birmingham, 2008, p. 6-16.

NICOLA, G. L.; MISSEL, F. G.; ZEILMANN, R. P.; Surface quality in milling of hardened H13 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** **49**. Londres, 2010, p.53-62.

OERKILON BALZERS COATING SERVICES. Folder do revestimento Balini®Futura Nano. Disponível em: < <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bpt/por/01-products-services/02-balinit-coatings/17-balinit-micran/indexW3DnavidW261.php>>. Acesso em: 17 maio de 2016.

OLIVEIRA, V. V. **Influência da geometria de brocas na furação do ferro fundido vermicular**. 2008. 45 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

OTEC PRÄZISIONSFINISHING. Finishing processes. [S.I.] Disponível em: < <http://www.otec.de/en/finishing-processes/rounding/>>. Acesso em: 21 de setembro de 2016.

PIERSON H. O. **Handbook of chemical vapor deposition (CVD): principles, technology and applications**. 2 ed. New York: Noyes Publications, 1999.

RISSE, K. **Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl**. 153 f, Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Aachen, Aachen, 2006.

RODRÍGUEZ, C. J. C., **Cutting edge preparation of precision tools by applying microabrasive jet machining and brushing**. Universidade de Kassel: 2009.

SANTANA, M. I. **Influência da preparação das arestas de corte de brocas helicoidais no processo de furação**. 2015. 148 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SME, **Society of Manufacturing Engineers**. Cutting Tool Edge Preparation, TECHNICAL PAPER SME MR p. 99-235, 1999.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**, 2ª Ed., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**, 2ª Ed., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**, 3ª Ed., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SIHVO, I., VARIS, J. **The wear of single flute gun drill and tool life tests**. ISSN 1392 - 1207. Finlândia, 2008.

TAYLOR, J. L. **Dicionário metalúrgico: inglês-português, português-inglês**. 2. ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2000.

WICK, C. **Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians**. 4. ed. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1988.

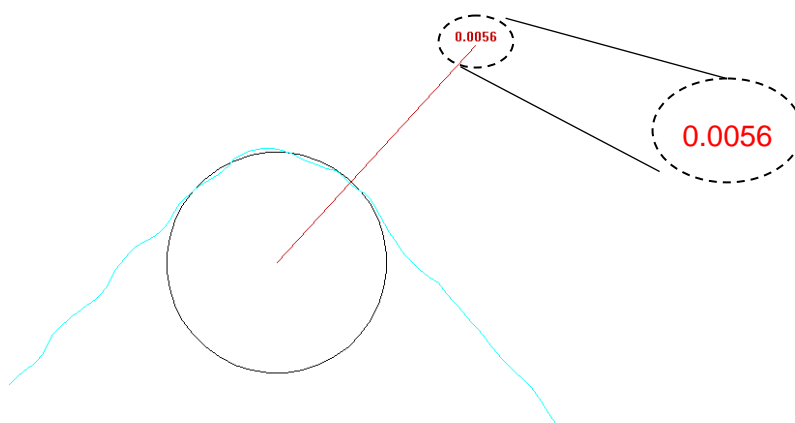
WOSNIAK, F. A. **Análise do processo de furação profunda no aço AISI 4150**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2011. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/diretorias/dirppg/programas/ppgem/banco-teses/dissertacoes/2011/WOSNIAKFabio.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2016.

WOSNIAK, F. A., POLLI, M. L., BELTRÃO, P. A. C. **Influência dos parâmetros de corte na furação profunda do aço SAE 4144**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/011036096.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2016.

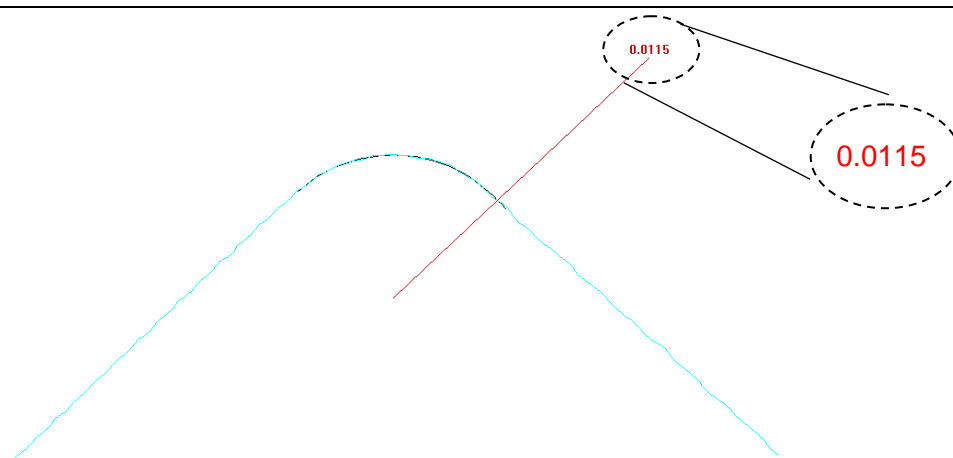
WYEN, C. F., KNAPP, W., WEGENER, K. A new method for the characterization of rounded cutting edges. **International Journal Manufacturing Technology**. Vol. 59. 2012. p. 899-914.

APÊNDICE A – EXEMPLOS DE RELATÓRIOS OBTIDOS POR RUGOSÍMETRO

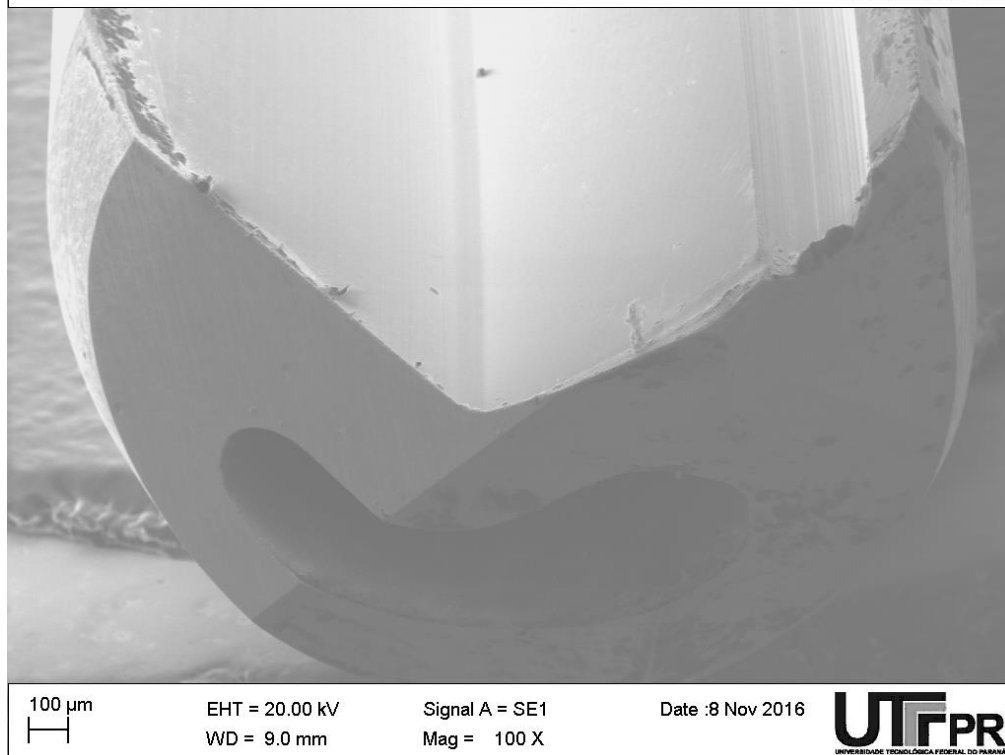
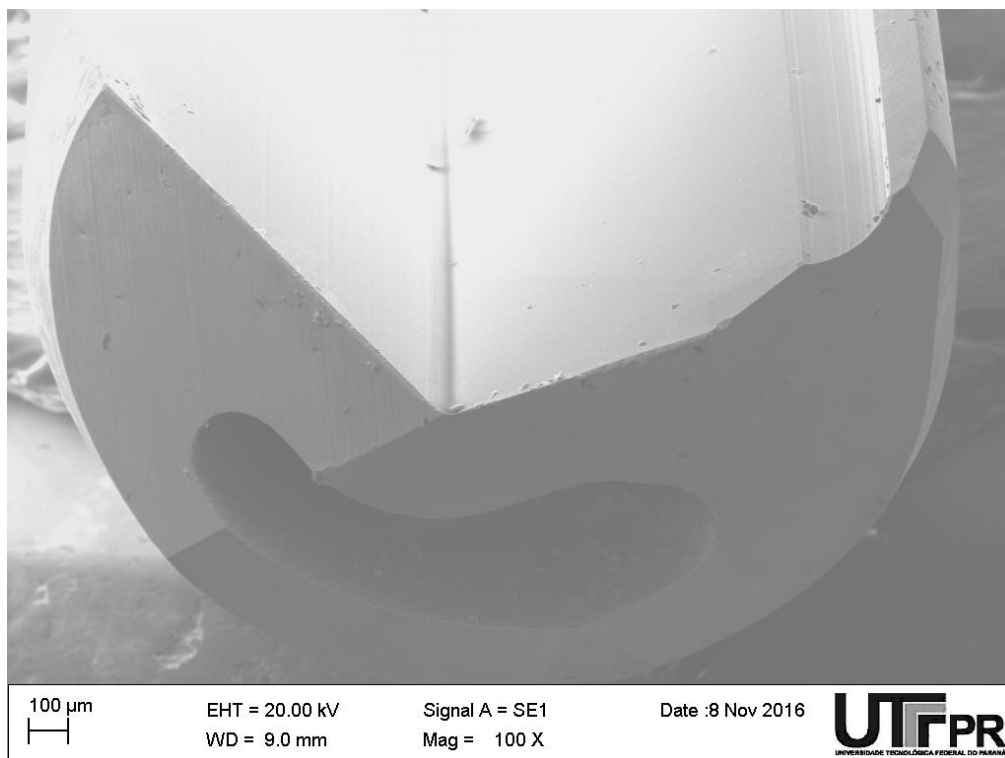
Arredondamento na aresta de corte após processo automático de 5 minutos



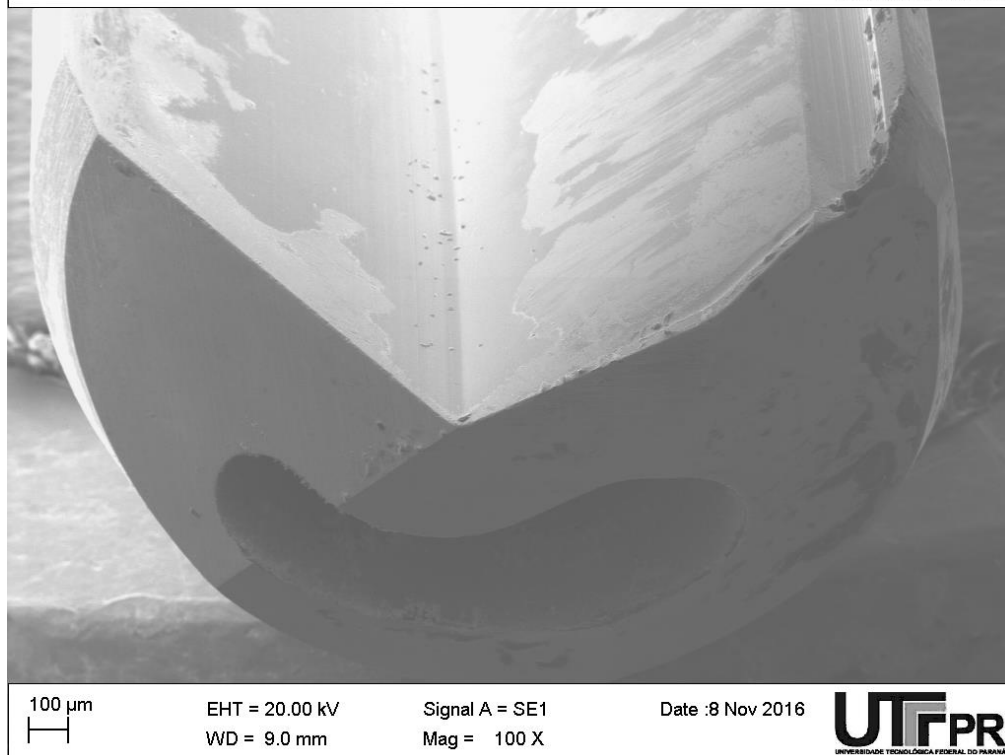
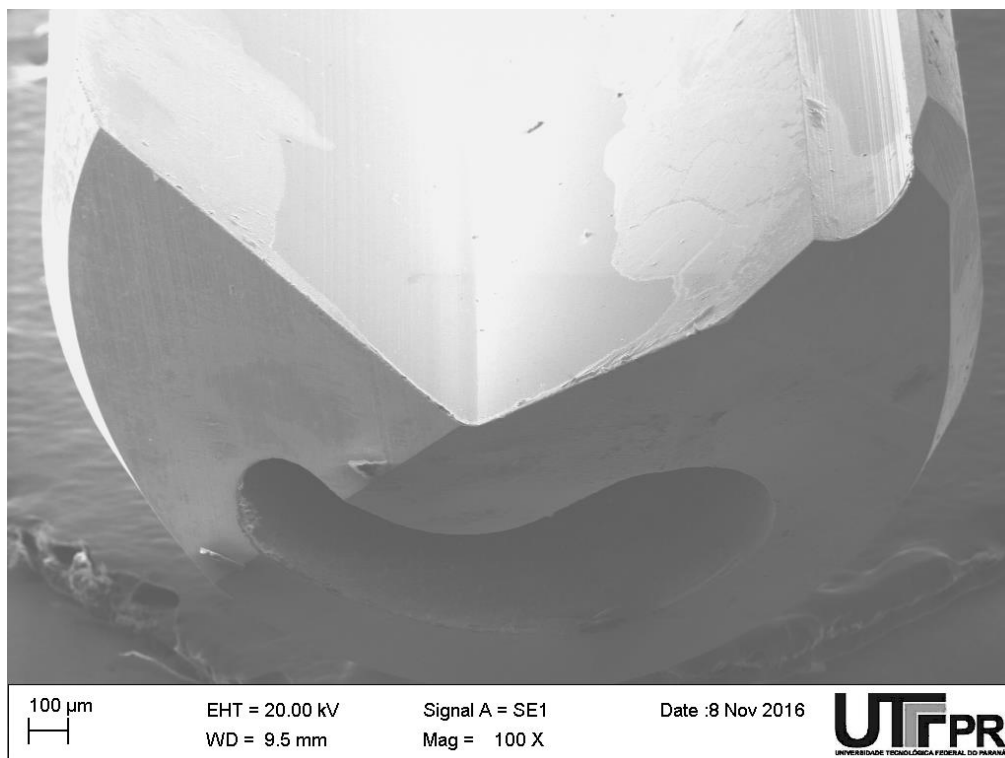
Arredondamento na guia após processo automático de 5 minutos



APÊNDICE B – IMAGENS OBTIDAS COM O MEV DA ARESTA DE CORTE DA FERRAMENTA SEM ARREDONDAMENTO ANTES E DEPOIS DA USINAGEM DE 50 PEÇAS



**APÊNDICE C – IMAGENS OBTIDAS COM O MEV DA ARESTA DE
CORTE DA FERRAMENTA COM ARREDONDAMENTO MANUAL
ANTES E DEPOIS DA USINAGEM DE 50 PEÇAS**



**APÊNDICE D – IMAGENS OBTIDAS COM O MEV DA ARESTA DE
CORTE DA FERRAMENTA COM ARREDONDAMENTO
AUTOMÁTICO ANTES E DEPOIS DA USINAGEM DE 50 PEÇAS**

