

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SELEÇÃO DE FERRAMENTA PARA O CORTE INTERROMPIDO DO AÇO AISI 8620
TRATADO TERMICAMENTE

por

Thaynara Fernanda da Silva

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2017

SELEÇÃO DE FERRAMENTA PARA O CORTE INTERROMPIDO DO AÇO AISI 8620
TRATADO TERMICAMENTE

por

Thaynara Fernanda da Silva

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Co-Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Patric Daniel Neis, Dr. Eng.

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, Dezembro de 2017.

“O sonho é que leva a gente pra frente. Se a gente for seguir a razão, fica acomodado, aquietado.”

Ariano Suassuna

AGRADECIMENTOS

Agradeço a tudo e a todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço aos meus pais, Sebastião Nilso da Silva e Mara Lucia Cavanos, por sempre terem acreditado em mim, mesmo nas situações mais adversas, e pelo apoio total, disponibilidade, dedicação, amor e valores que me foram ensinados.

Agradeço especialmente aos meus amigos feitos em Porto Alegre durante a graduação, por terem se tornado minha família gaúcha, e por estarem presentes em todos os momentos, sempre oferecendo suporte e me acolhendo, particularmente a Gabriela Seibert, Tiago Stein, Cícero Pereira da Silva e Bruna Zanardo. Também as minhas amigas de infância, Anne Girardello, Barbara Comelli, Fernanda Margotti, Gabriela Finger e Tatiana Peiter, que comprovaram que a amizade verdadeira resiste ao tempo e a distância, e permanecem presentes na minha vida.

Agradeço ao meu orientador, professor Heraldo José de Amorim, por toda a dedicação, disponibilidade e paciência, e pela tranquilidade transmitida.

Agradeço ao professor André João de Souza, pela coorientação e por ter despertado em mim com suas aulas o interesse pela usinagem. Também a toda equipe do LAUS, que foi extremamente solícita.

Agradeço a Vitor e Cristiano, da Rodama, pela confiança, apoio e disponibilidade.

SILVA, T. F. (ex.: F. B.) **Seleção de ferramenta para o corte interrompido do aço AISI 8620 tratado termicamente**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O torneamento duro, feito em metais com durezas normalmente acima de 45 HRC, tem sido cada vez mais utilizado em substituição a operações de retificação. Esse processo é usualmente utilizado para o acabamento de peças em tornos CNC. As ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN) são as mais indicadas para o torneamento de materiais endurecidos. No entanto, seu custo elevado torna recomendável um estudo de desempenho e custo/benefício antes de sua adoção. Este trabalho tem como objetivo a seleção de ferramentas de corte de materiais alternativos ao CBN para a produção com menor custo de peças em uma empresa do ramo metalúrgico. A peça estudada foi uma engrenagem cônica de dentes retos com um rasgo de chaveta interno, fabricada em aço AISI 8620 e tratada termicamente para a obtenção de uma dureza superficial entre 58 e 60 HRC. A operação estudada foi a usinagem interna dessa peça, caracterizada por duas situações complexas: o torneamento duro e o corte interrompido. Foram realizados testes com três diferentes ferramentas de corte, sendo uma cerâmica e duas em metal duro com diferentes coberturas e raios de ponta. Os resultados obtidos demonstraram que para a pastilha de cerâmica ter melhores resultados, seus parâmetros de corte não poderiam ser os mesmos utilizados para as ferramentas de metal duro. A ferramenta que apresentou melhor desempenho nos testes foi a de metal duro com cobertura de PVD e menor raio de ponta, usinando todas as peças utilizadas no experimento sem apresentar nenhum tipo de quebra. Mesmo não tendo sido testado até seu fim de vida, esse inserto apresentou um melhor desempenho econômico em comparação com a de CBN em termos de custo com ferramenta por peça produzida.

PALAVRAS-CHAVE: AISI 8620, corte interrompido, torneamento duro.

SILVA, T. F. **Tool selection for interrupted cutting of thermally treated AISI 8620 steel.** 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Hard turning, of metals with hardness above 45 HRC has been increasingly used in substitution of grinding operations for finishing parts on CNC lathes. Cubic boron nitride (CBN) tools are best suited for turning hard materials. However, their higher cost when compared with other cutting tool materials points toward a thoughtful cost-benefit study prior to its adoption. The goal of this work is the selection of alternative cutting tools for the production of parts in a metallurgical company that currently uses CBN. The case studied was the internal finishing turning of a conical spur gear with an internal keyway, made of AISI 8620 steel and thermally treated for a surface hardness between 58 and 60 HRC. This operation was characterized by two complex situations, i.e. hard turning and interrupted cut. Tests were performed with three different cutting tools, one ceramic and two carbide tools with different coatings and nose radius. Results obtained demonstrate that for better results of a ceramic insert, its cutting parameters are not the same used by carbide tools. The tool that presented better performance in the tests was a carbide tool with PVD coating and lower nose radius, that allowed the machining of more parts without reaching any tool-life criteria. Even though tool-life was not reached due to time restrictions, this insert presented better economic performance in terms of tool cost per machined part when compared with CBN tools.

KEYWORDS: AISI 8620, interrupted cut, hard turning.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1	Torneamento duro.....	1
2.2	Corte interrompido.....	3
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
3.1	Apresentação do problema.....	4
3.2	Corpo de prova.....	5
3.3	Ferramentas de corte.....	6
3.4	Parâmetros de corte.....	7
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
4.1	Rugosidade da superfície usinada.....	8
4.2	Desgaste da ferramenta.....	10
4.3	Relação custo x benefício.....	11
5.	CONCLUSÕES	12
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
	Anexo A.....	16
	Apêndice B.....	17
	Apêndice C.....	18
	Apêndice D.....	19

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é dotado de uma grande quantidade de pequenas indústrias, que são de grande importância para a economia e geração de empregos, principalmente em cidades de menor porte. Muitas vezes, essas indústrias tem dificuldade em renovar o maquinário e acompanhar a tecnologia, o que as deixa em desvantagem em termos de competitividade. Por terem maquinário limitado, alguns processos que normalmente seriam feitos em máquinas específicas acabam sofrendo adequações para que possam ser executados de outra forma. É o caso do processo estudado neste trabalho, onde a ausência de retificadora exigiu o uso de torneamento duro.

O caso de estudo foi selecionado numa fábrica da cidade de Lagoa Vermelha, Rio Grande do Sul, se refere à fabricação de uma engrenagem cônica com 15 dentes retos com um rasgo de chaveta interno (utilizada para descarregamento de ração em caminhões). Fabricada em aço AISI 8620 cementado, a peça passa por uma têmpera em óleo com profundidade entre 0,8 mm e 1 mm, resultando em uma dureza superficial entre 58 e 60 HRC. Após isso, a medida interna deve ser corrigida, para fins de ajuste de tolerância.

Na operação de acabamento interno é retirado aproximadamente 0,04 mm de sobremetal. Usualmente, esse tipo de processo é realizado por máquinas que utilizam ferramentas de geometria não definida, por exemplo, retificadoras. A fábrica não possui essa opção, então o acabamento é feito por torneamento duro. A ferramenta utilizada era uma pastilha de CBN da marca Sumitomo Electric, 6NC-TNGA 16 04 12, indicada para operações de desbaste e acabamento em aços endurecidos.

Após usinar no máximo 30 peças com cada aresta, sendo que o esperado era que fossem usinadas 300, ocorria a falha do inserto de CBN. O custo elevado do inserto fez com que a fábrica buscasse uma alternativa.

O objetivo deste trabalho é buscar soluções para os problemas presentes no processo de acabamento da engrenagem: quebra precoce da ferramenta de corte e alto custo final. Para isso, será feito um estudo de caso para buscar parâmetros de entrada adequados para este tipo de usinagem. Também serão buscadas opções de ferramentas alternativas à CBN, com menor custo para executar a operação. Destacam-se duas situações complexas para a finalização dessa peça: corte interrompido e torneamento de materiais endurecidos.

Foram feitos testes com três pastilhas: cerâmica (TNGA 16 04 12 T01020), metal duro com cobertura de PVD com micro grãos (TNMG 16 04 08 EM TT 9080), e metal duro com cobertura de PVD com micro grãos (TNMG 16 04 12 SF 1125).

A adaptação do processo de trabalho apresenta vantagens, como maior produtividade do torneamento duro em comparação com a retificação, boa qualidade da superfície usinada e menor impacto ambiental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Torneamento duro

O Torneamento duro é uma operação de usinagem, normalmente utilizada para realizar o processo de acabamento e finalização de peças com altas durezas após terem sido tratadas termicamente. Segundo Machado et al., 2015, esses materiais endurecidos devem ter durezas acima de 45 HRC, já Klock et al., 2008, afirmam que para ser considerado um torneamento duro, a dureza deve ser superior a 50 HRC. Usualmente, na indústria, a aplicação deste recurso acontece com elementos que tenham durezas entre 55 HRC e 68 HRC.

O processo de fabricação tradicionalmente utilizado para o acabamento de materiais endurecidos é a retificação, pois trabalha com tolerâncias estreitas e oferece um acabamento superficial de boa qualidade. No entanto, como mostra a Figura 2.1, oferece baixa produtividade quando comparada a outros processos de fabricação, e é suscetível a danos graves na peça quando não é executada corretamente. O torneamento duro surgiu em meados de 1970, tornando-se uma alternativa às operações que utilizam ferramentas com geometria não definida.

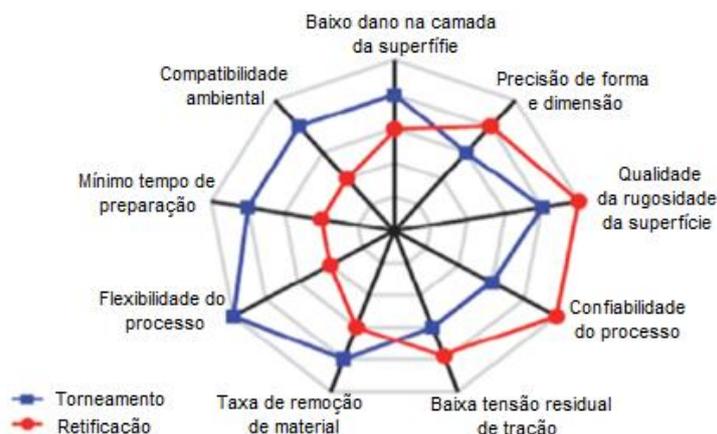


Figura 2.1 - Características das operações de torneamento de materiais endurecidos e retificação (Adaptado de Klocke et al., 2005).

O processo de torneamento de materiais endurecidos se tornou possível com a evolução dos tornos CNC, pois exige estabilidade e rigidez do conjunto máquina, porta ferramenta, ferramenta e peça, que deve ser capaz de suportar as duras condições tribológicas ocasionadas pela remoção do cavaco devido às altas temperaturas, altas tensões de ruptura para formação de cavaco, e de altas tensões aliviadas. Além disso, as forças de corte também têm valores bastante elevados. As tolerâncias estreitas e a qualidade superficial exigidas numa operação de acabamento dependem diretamente disso.

Como em outras operações de usinagem, os resultados do torneamento duro dependem fortemente dos parâmetros de processo. As ferramentas mais usadas neste processo são de CBN e cerâmica, e para ambas a indicação é que sejam utilizadas altas velocidades de corte e valores baixos de avanço e profundidade de corte. Segundo a Sandvik Coromant, uso de fluido de corte não é indicado pois, devido às altas temperaturas, a capacidade de resfriamento do inserto é muito pequena, e a refrigeração da região a ser usinada na peça pode ser prejudicial, aumentando a dificuldade da remoção do cavaco.

A usinagem de materiais endurecidos é um processo de produção mais simples, se comparado à retificação. Semelhante ao torneamento tradicional, com a vantagem da maior flexibilidade da máquina, por exemplo, pode ser usado para torneamento interno e externo. Em aplicações apropriadas oferece maior produtividade, flexibilidade na troca de tipos de peças, efetuar várias operações em uma única montagem, custo menor por peça, maior remoção de material, além de permitir formatos complexos.

Quanto à qualidade superficial obtida pelo torneamento duro, medida através da rugosidade média, depende da qualidade do aço usinado, da ferramenta de corte utilizada, da sua geometria e dos parâmetros de corte aplicados no processo. Segundo Ferrari, 2017, a qualidade alcançada pode ser tão boa ou melhor do que a de uma superfície retificada, podendo-se conseguir classes N4, Ra 0,2 μm , N5, Ra 0,4 μm e N6, Ra 0,8 μm .

Uma desvantagem do torneamento duro é o surgimento de campos de tensões residuais indesejáveis e alterações de microestrutura superficial, como formação de camada branca (Grzesik, 2008). Porém, König et al., 1993, afirmam que tensões de tração prejudiciais à resistência a fadiga do material somente ocorrem na peça torneada se ela for usinada por uma ferramenta já bastante desgastada. Outra dificuldade é que os parâmetros de corte estão localizados em um intervalo estreito de valores do que os do torneamento convencional. A seleção equivocada pode levar a uma combinação de baixa vida de ferramenta, acabamento superficial pobre, precisão dimensional inaceitável ou mesmo ao início de vibração auto excitada, o “*chatter*” (Dogra et al., 2010). Marcas causadas pelo “*chatter*” podem ser observadas na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Acabamento deteriorado pela ocorrência de “chatter” (Adaptado de Sortino et al., 2012)

Um ponto muito importante na usinagem é o impacto ambiental. Segundo Agapiou et al., 2006, e a Sandvik Coromant, 2012, torneamento duro apresenta consumo de energia reduzido, possibilidade de reciclar o cavaco e o fluido de corte. A opção de usinar sem fluido de corte quando se utiliza torneamento é uma vantagem muito grande deste processo em relação à retificação. Como o cavaco gerado no processo de retificação é muito pequeno e como a vazão de fluido de corte na retificação é grande, forma-se uma borra de cavaco e fluido que causa problemas para filtragem e reciclagem do fluido (Tönshoff et al., 2000). Além disso, o descarte de rebolos utilizados na retificação é consideravelmente prejudicial, por gerar um grande volume de sucata, e a dressagem dos rebolos é um processo que demanda energia e tempo.

A Sandvick Coromant faz algumas recomendações específicas para torneamento duro: evitar rebarbas na peça a ser usinada, manter as tolerâncias dimensionais estreitas, fazer o chanfro e produzir os raios no estágio verde, não entrar ou sair do corte de forma abrupta, entrada ou saída, para fora ou para dentro do corte, por rolagem.

2.2 Corte interrompido

O processo de torneamento com corte interrompido é muito comum na indústria. Acontece quando são usinadas peças cuja geometria inicial é diferente da cilíndrica, como barras de seção quadrada, por exemplo, ou quando existem descontinuidades em materiais cilíndricos, como furos transversais ou rasgos de chaveta (Figuras 2.3 e 2.4). Existem três fatores importantes quando o processo de corte acontece de forma interrompida: a entrada da ferramenta na peça, a saída da ferramenta quando se inicia a interrupção do corte, e os ciclos térmicos e mecânicos (Pekelharing, 1980).



Figura 2.3 - Corte interrompido em peça cilíndrica contendo rasgos de chaveta (Adaptado de Sanchez, 2011).



Figura 2.4 - Representação esquemática do início do contato no corte interrompido com peça predominantemente cilíndrica contendo rasgos de chaveta (Adaptado de Sanchez, 2011).

No torneamento interrompido de peças com rasgo de chaveta a entrada da ferramenta na peça ocorre de forma abrupta, ocasionando um choque mecânico considerável. Tanto essa colisão, causada pela entrada da aresta de corte na peça, quanto a saída da pastilha podem ocasionar trincas de origem mecânica. Essas trincas costumam ocorrer na usinagem com baixas velocidades de corte e paralelamente à aresta de corte, tanto na superfície de saída como na superfície de folga da ferramenta, culminando em lascamentos que podem condenar a ferramenta. Se o processo é feito de forma incorreta, esse lascamento ou mesmo uma quebra podem ocorrer no primeiro ciclo, em virtude de condições abusivas ou inadequadas. Entretanto, mesmo trabalhando adequadamente, a aresta estará sujeita a um carregamento repetitivo a cada entrada na peça, que pode levar ao aparecimento de trincas por fadiga.

Segundo Shaw, 2005, os ciclos térmicos ocorrem em função da variação da temperatura ocasionada pelo revezamento entre as fases ativa e inativa da ferramenta de corte. Na fase ativa, a ferramenta é aquecida em decorrência da remoção de cavaco. Na fase inativa ocorre o resfriamento, pois não há remoção de material. Em função disso, as temperaturas do corte interrompido flutuam ciclicamente aumentando durante o tempo ativo da aresta de corte e diminuindo durante o tempo inativo. A velocidade de corte, o avanço e a relação entre o tempo ativo e inativo de um ciclo, do material da ferramenta de corte e do material da peça são responsáveis pela distribuição de temperatura durante o ciclo. Segundo Machado et al., 2015, a flutuação cíclica da temperatura na interface ferramenta/cavaco leva a uma modificação da distribuição de tensão na região de corte da ferramenta que pode provocar trincas térmicas. A camada superficial, a uma temperatura bastante alta, se dilata. Entretanto, as camadas subsequentes, a temperaturas inferiores, terão uma dilatação menor. Como consequência, tais camadas impedirão o processamento de uma dilatação maior na camada superficial. Dessa forma, originam-se na camada superficial tensões de compressão. Em decorrência disso, haverá a uma determinada distância das superfícies de contato, tensões de tração. Em seguida, com a variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada de contato devido ao tempo inativo, essa camada estará submetida a uma tração, processo inverso ao do tempo ativo, enquanto as camadas subsequentes passarão a ser solicitadas à compressão, e, em função do perfil da temperatura interna, passarão novamente a tensões de tração a partir de uma determinada distância da superfície de saída.

As flutuações cíclicas da tensão, cujas taxas dependem da rotação, podem chegar a valores consideráveis, promovendo o aparecimento de trincas de fadiga, principalmente nas ferramentas de metal duro. Normalmente isso ocorre com altas velocidades de corte. Outra variável importante no processo de formação de trincas de origem térmica é o fluido de corte. Se usado de forma inconstante pode levar ao aparecimento desse tipo de avaria.

Ainda é possível haver uma combinação entre trincas térmicas e trincas mecânicas, que pode levar ao lascamento da aresta de corte. Esse tipo de avaria pode ocorrer em ferramentas sob fortes variações (cíclicas) de temperatura e sujeitas a muitos choques mecânicos.

Segundo Machado et al., 2015, arestas das ferramentas de corte usadas no corte interrompido são frequentemente substituídas em virtude de trincas, lascamentos ou quebras. O desenvolvimento do desgaste uniforme na superfície de folga ou de saída é dominante quando o inserto possui tenacidade suficiente para resistir aos choques térmicos e mecânicos. Segundo Ferraresi, 2017, em relação à geometria da ferramenta, quanto mais positivo o ângulo de saída menor é a deformação imposta ao material, diminuindo assim os esforços de corte. Em contrapartida, isso ocasiona uma redução do ângulo de cunha da ferramenta, facilitando a ocorrência de uma fratura durante a efetuação do corte interrompido.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Apresentação do problema

Inicialmente, o problema enfrentado era a quebra precoce do inserto de CBN Sumitomo Electric 6NC-TNGA 160412, utilizado para a usinagem interna da engrenagem. Apesar de ser o tipo de pastilha indicado pela literatura para torneamento duro, os resultados apresentados

eram insatisfatórios. A baixa tenacidade deste tipo de ferramenta a torna sensível a avarias causadas por vibrações, que são críticas nas operações as quais a peça ou a ferramenta são suscetíveis a grandes deflexões.

Cada aresta produzia no máximo 30 peças antes de falhar, o que não era condizente com o comportamento esperado da ferramenta. Além disso, o custo deste inserto é alto, e com a quebra precoce o processo estava causando prejuízo. Os parâmetros de corte utilizados eram: velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,12 mm/rev e profundidade de corte de 0,02 mm. Para esta operação é utilizado o fluido de corte Blaser Blasocut BC 20, base mineral, miscível em água. Observando estes valores, notou-se que o problema estava na escolha equivocada dos parâmetros de entrada. Tendo chegado a esta conclusão, e sabendo que insertos de CBN exigem altas velocidades de corte, baixos avanços, torno CNC e porta ferramentas robustos, estes tópicos foram analisados.

O torno utilizado é um Faruc Series 21i-TB, considerado adequado para este tipo de operação de acabamento. O porta ferramentas é um S25T-PTFNR-16W, também adequado para o processo, apresentando a rigidez necessária. Sabendo disso, os parâmetros de corte foram alterados. Segundo Bartarya et al., 2011, a faixa de velocidade de corte mais comum quando se torneia aço endurecido com ferramentas cerâmicas ou de CBN é entre 100 e 250 m/min. Também devem ser usadas pequenas profundidades de corte ($ap \leq 0,2$ mm), pequenos avanços (f de 0,05 a 0,2 mm/rev) e grandes raios de ponta da ferramenta ($r\epsilon \geq 0,8$ mm).

Modificando os parâmetros de entrada, optou-se por uma velocidade de corte de 180 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,01 mm. Com esta alteração, a produção passou de aproximadamente 30 peças por aresta para 300 peças por aresta, um resultado coerente com o esperado de insertos de nitreto cúbico de boro.

Tönshoff et al., 2000, testaram outros materiais de ferramenta, como as cerâmicas puras, os sialons e as cerâmicas reforçadas com whiskers na usinagem do AISI 5115, dureza de 60 HRC, cementado. Porém também concluíram que o CBN é o material que melhor se aplica à usinagem de aços endurecidos.

Apesar da resolução do problema com a ferramenta de CBN e das indicações da literatura, decidiu-se procurar alternativas mais econômicas de insertos para torneamento duro com corte interrompido.

3.2 Corpo de prova

A engrenagem cônica de dentes retos (Fig. 3.1) fabricada em aço AISI 8620 foi fornecida por uma indústria de peças agrícolas localizada em Lagoa Vermelha, Rio Grande do Sul. Ela passa por um tratamento térmico de cementação com profundidade entre 0,6 e 0,8 mm, e de têmpera em óleo com profundidade entre 0,8 mm e 1 mm após a sua fabricação. Esse tratamento a deixa com uma dureza superficial entre 58 e 60HRC.



Figura 3.1 - Engrenagem cônica de dentes retos com rasgo de chaveta interno.

Torneamentos internos de aços endurecidos são necessários devido a distorções e variações dimensionais resultantes de tratamentos térmicos. O torneamento duro é o último processo pelo qual esse componente mecânico é submetido.

O AISI 8620 é um aço para cementação e posterior beneficiamento ligado ao níquel, cromo, e molibdênio (Tab. 3), o que lhe confere melhor temperabilidade. Esse material é amplamente utilizado na fabricação de peças em que há necessidade de dureza superficial e resistência ao desgaste, obtida pelo processo de cementação. A camada cementada tem uma concentração variável de carbono ao longo da profundidade. Ela decresce a partir da superfície em direção ao núcleo, com a conseqüente mudança gradual da composição química da camada. A profundidade desta camada depende da temperatura do processo, do tempo e da atividade do meio carbonetante.

Quando cementado e temperado, o AISI 8620 pode atingir durezas superficiais de até 62 HRC, enquanto a dureza do núcleo varia, dependendo das dimensões, entre 30 e 45 HRC, oferecendo boa resistência mecânica e à fratura. Além disso, esse material apresenta boa usinabilidade.

Tabela 3 - Composição do aço AISI 8620 (Adaptado de Ferraresi, 2017).

ABNT/SAE 8620	C	Mn	Ni	Cr	Mo
Mínimo	0,18	0,70	0,40	0,40	0,15
Máximo	0,23	0,90	0,70	0,60	0,25

3.3 Ferramentas de corte

Foram selecionadas três ferramentas de corte com formato triangular, ângulo de folga de 0° e espessura de 4,76 mm, assim como o inserto de CBN, Sumitomo Electric, 6NC-TNGA 160412.

A primeira escolha foi a pastilha de cerâmica da Sandvik Coromant, TNGA 16 04 12 T01020, indicada para usinagem de ferros fundidos, com condição de aresta de corte de fase negativa, raio de ponta de 1,2 mm, largura de flanco de 0,10 mm e ângulo de chanfro de 20°.

As pastilhas de cerâmica, assim como as de CBN, são indicadas para o torneamento duro. Segundo Suyama, 2014, elas são indicadas para materiais com dureza entre 40 e 50 HRC, com a ressalva de que a superfície fabricada por elas terá uma rugosidade maior. A Figura 3.2 mostra uma comparação entre pastilhas de CBN e cerâmica.

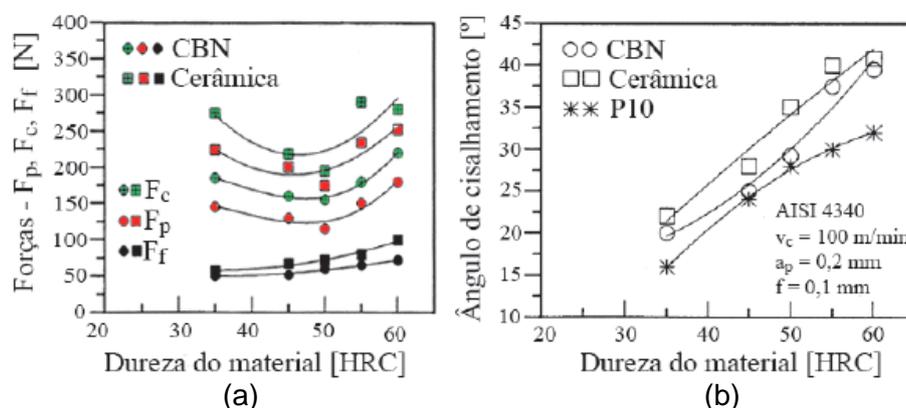


Figura 3.2 – (a) Comportamento das componentes da força de usinagem e (b) ângulo de cisalhamento em função da dureza do material usinado (Adaptado de Luo et al., 1999)

As outras duas escolhas foram insertos de metal duro com cobertura de PVD, que é indicado para corte interrompido por possuir tenacidade adequada. Segundo Diniz et al., 2008, ferramentas de metal duro com camadas de coberturas duras representam uma grande parte

das ferramentas atualmente utilizadas no mercado mundial de usinagem. A principal finalidade dessas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça. Outra função dos revestimentos nas ferramentas de usinagem é proteger o substrato da ferramenta. Bouzakis et al., 2012, exemplificou a função do revestimento em função das cargas mecânicas e térmicas que atuam sobre a aresta durante a remoção de material, conforme a Figura 3.3.

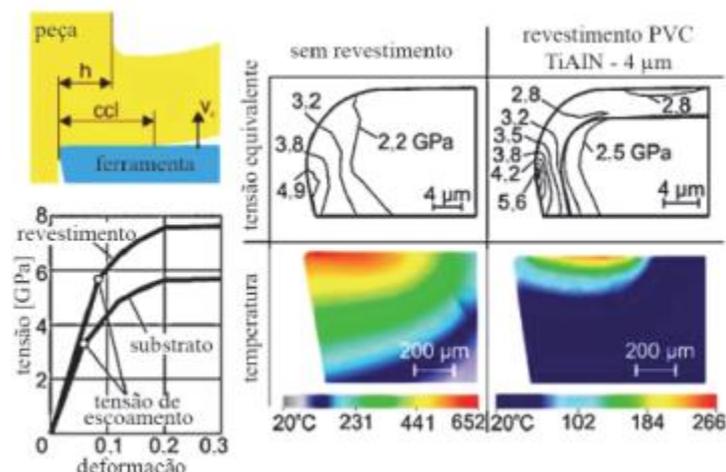


Figura 3.3 - Redução de carga térmica e mecânica na ferramenta de metal duro em função da aplicação do revestimento PVD-TiAlN (Adaptado de Bouzakis, 2012).

O núcleo da pastilha continua com a tenacidade característica do metal duro simples, WC + Co e, desta maneira, consegue-se em muitos casos, aumentar a vida da ferramenta e diminuir os esforços de corte. Isso torna possível unir tenacidade com resistência ao desgaste e dureza a quente.

A ISO classifica as ferramentas de metal duro em classes P, M, K, N, H e S, de acordo com o material da peça a ser usinada: Classe P (aços); Classe M (aços inoxidáveis); Classe K (ferro fundido); Classe N (alumínio); Classe H (aços endurecidos); Classe S (superligas).

A segunda escolha foi a pastilha de metal duro com cobertura de PVD (Ti,Al)N+(Al,Cr)2O3, nitreto de titânio-alumínio e óxido de alumínio cromo, e grãos de carboneto de tungstênio ultrafinos: Sandvik Coromant TNMG 16 04 12 SF 1125, raio de ponta de 1,2 mm, com quebra cavaco, classe S e M, ou seja, é indicada para usinagem de superligas resistentes ao calor e aços inoxidáveis. A partir de agora essa ferramenta será denominada como “P1”.

A terceira escolha foi a pastilha de metal duro com cobertura de PVD AlTiN-Tin, nitreto de alumínio-titânio e nitreto de titânio, e grãos de carboneto de tungstênio ultrafinos: Taegutec, TNMG 16 04 08 EA TT 9080, raio de ponta de 0,8 mm, com quebra cavaco, classe S e M, ou seja, indicada para usinagem de superligas resistentes ao calor e aços inoxidáveis. Segundo o fabricante, ela é indicada para operações de acabamento, materiais exóticos e um excelente controle de cavaco com baixos avanços e baixas profundidades de corte. A partir de agora essa ferramenta será denominada como “P2”.

3.4 Parâmetros de corte

Os principais parâmetros no torneamento são velocidade de corte, avanço e profundidade de corte (Davim, 2001). Velocidade de corte é a velocidade com a qual o material das peças é removido pela aresta cortante da ferramenta. Este deslocamento da aresta cortante da ferramenta em direção à peça se expressa em metros por minuto. A velocidade de corte pode ser expressa pela Equação 3:

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (3)$$

Onde: V_c = velocidade de corte (m/min), π = constante cilíndrica, D = diâmetro da peça (mm), n = rotação por minuto (rpm), 1000 = constante para transformar milímetros (mm) em metros (m).

Outro fator que influencia diretamente o torneamento é a profundidade de corte, que é o quanto a ferramenta de corte irá penetrar na peça. É expressa em milímetros (mm). Quanto menor a profundidade de corte menor o esforço de corte e potência exigida pela máquina. Por esse motivo, em operações de acabamento se retira pouco material para que haja um processo estável e um bom acabamento superficial (Diniz et al., 2008).

A intenção era que os parâmetros de corte utilizados para as três diferentes ferramentas selecionadas fossem os mesmos, para que fosse possível fazer uma comparação direta. Entretanto, como uma das ferramentas selecionadas foi de cerâmica, ela acabou sendo utilizada com diferentes parâmetros.

Inicialmente, o inserto de cerâmica foi utilizado com os mesmos parâmetros de corte dos insertos de metal duro, o que resultou em uma quebra extremamente precoce. Com isso, alterações foram feitas ao longo dos testes, utilizando diferentes velocidades de corte. Foram utilizadas velocidades de corte entre 40 e 180 m/min, e avanços de 0,1 e 0,05 mm/rev.

Para as pastilhas de metal duro, usou-se velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,01 mm. Dessa maneira, foram fabricadas inicialmente dez peças com cada aresta, e então analisados o desgaste de cada aresta das ferramentas e a rugosidade da última engrenagem usinada por cada aresta. Após isso o processo foi repetido, usinando mais dez peças com cada aresta, utilizando os mesmos parâmetros de corte, e as análises de desgaste de ferramenta e rugosidade da superfície usinada foram também repetidas.

Em duas das arestas de corte da pastilha de metal duro P2, foi feito um teste para ver qual seria o comportamento com o aumento da velocidade de corte. A velocidade utilizada foi 120 m/min, sem modificar o avanço e a profundidade de corte. A aresta de corte ficou inutilizada com a usinagem de apenas duas peças, gerando superfícies com elevados valores de rugosidade, com valores médios de $0,75 \mu\text{m}$. Os resultados obtidos nessa condição não foram satisfatórios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rugosidade da superfície usinada

O avanço deixa marcas na superfície da peça usinada, por este motivo é o primeiro parâmetro a ser selecionado, pois influencia diretamente no acabamento do processo, como mostram a Eq. 4.1 e a Figura 4.1 (Thiele et al., 1999).

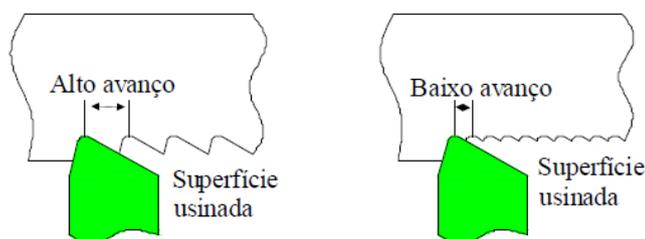


Figura 4.1 - Efeito do avanço na rugosidade da superfície usinada (Adaptada de Costa, 2016).

$$Ra = \frac{f^2}{31,2 r\epsilon} \quad (4.1)$$

Onde Ra é a rugosidade média (μm), f é o avanço (mm) e $r\epsilon$ é o raio de ponta da ferramenta (mm). Utilizando um rugosímetro, foram efetuadas três medidas na entrada da ferramenta de corte e três na saída, totalizando seis medidas em cada uma das últimas peças

usinadas por cada aresta de cada ferramenta. Foi levada em consideração a rugosidade aritmética ou média (R_a), usualmente utilizada no controle contínuo de processos de produção (Fig. 4.2), que tem seu parâmetro determinado em função da linha média do perfil de rugosidade (Eq. 4.2).

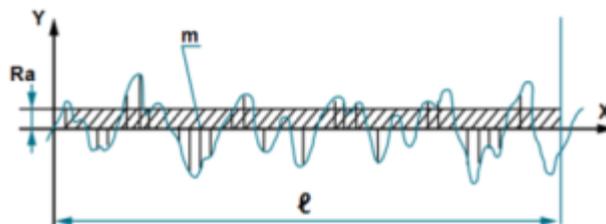


Figura 4.2 - Rugosidade R_a (Adaptado de Mitsubishi, 2006).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (4.2)$$

Deve-se ressaltar que para o inserto de cerâmica foram utilizados variados parâmetros de entrada. Essa ferramenta resultou nos maiores valores de rugosidade da superfície usinada, como ilustra a Tab. 4.1.

Tabela 4.1 - Rugosidade média das peças usinadas com o inserto de cerâmica

Aresta da ferramenta	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Velocidade de corte [m/min]	80	40	40	50	110	180
Avanço [mm/rot]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
Profundidade de corte [mm]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Número de peças obtidas	2	5	5	3	1	10
Rugosidade média [μm]	1,13	0,43	0,53	1,26	0,88	0,51

Com as pastilhas de metal duro foram utilizados os mesmos parâmetros de entrada, então é possível fazer uma comparação direta.

Tabela 4.2 - Rugosidade média das peças usinadas pela pastilha com r_e de 1,2 mm com velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,01 mm.

PASTILHA DE METAL DURO P1			
Aresta	R1	R2	R3
Quantidade de peças (unidade)	10	5	10
Rugosidade média (μm)	0,27	0,65	0,3
Desvio padrão amostral	0,03	0,02	0,01

Fim da vida do inserto

Tabela 4.3 - Rugosidade média das peças usinadas pela pastilha com r_e de 1,2 mm com velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,01 mm.

PASTILHA DE METAL DURO P1			
Aresta	R1	R2	R3
Quantidade de peças (unidade)	17	-	11
Rugosidade média (μm)	0,5	-	0,49
Desvio padrão amostral	0,47	-	0,17

Fim da vida do inserto

Tabela 4.4 - Rugosidade média das peças usinadas pela pastilha com r_e de 0,8 mm com velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,01 mm.

PASTILHA DE METAL DURO P2			
Aresta	R1	R2	R3
Quantidade de peças	10	10	10
Rugosidade média (μm)	0,33	0,24	0,22
Desvio padrão amostral	0,05	0,02	0,04

Tabela 4.5 - Rugosidade média das peças usinadas pela pastilha com r_e de 0,8 mm com velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,01 mm.

PASTILHA DE METAL DURO P2			
Aresta	R1	R2	R3
Quantidade de peças	20	20	20
Rugosidade média (μm)	1,02	0,29	0,24
Desvio padrão amostral	0,42	0,02	0,03

4.2 Desgaste da Ferramenta

A norma ISO 3685/93, apresenta critérios para o monitoramento de desgaste de ferramentas através de parâmetros bidimensionais, medidos nas superfícies de folga e de saída da ferramenta.

Os desgastes que as ferramentas sofrem são originados principalmente pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre essa e a peça. Vários mecanismos intervêm neste desgaste, tais como cisalhamento de microsoldas, abrasão mecânica, difusão intermetálica e oxidação. A ação desses fatores também está relacionada com a temperatura de corte, que depende principalmente da velocidade de corte (Diniz et al. 2010). Durante o processo de usinagem esses fatores geram alguns danos à aresta de corte. Esses danos são classificados em danos normais, como desgaste de flanco e craterização, e danos anormais como fratura, quebra, soldagem, microlascamento, entalhe, trincas, deformação plástica e delaminação do revestimento.

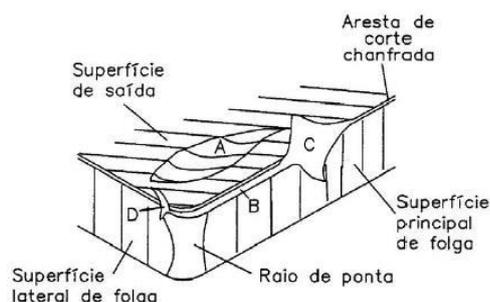


Figura 4.3 - Principais regiões de desgaste na aresta de corte (Adaptado de Dearnley, 1982).

Segundo Santos et al., 2007, a norma ISO 3685 utiliza os parâmetros K_T , V_B , $V_{B\text{MÁX}}$ e V_{BN} para quantificar o desgaste nas ferramentas de corte. O critério recomendado para avaliar as ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmica é: desgaste de flanco médio, $V_B = 0,3$ mm; desgaste de flanco máximo, $V_{B\text{MÁX}} = 0,6$ mm; profundidade da cratera, $K_T = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço em mm/rot; falha catastrófica.

Segundo Ferraresi et al., 1977, com o aumento da dureza de uma peça o desgaste de flanco também aumenta. Quando a aresta de corte entra em contato com a peça, é gerado um impacto maior e a resistência ao corte aumenta. Segundo Costa, 2016, partículas duras podem

existir dentro da composição do material da peça usinada, e elas podem arranhar a superfície da aresta de corte gerando um aumento do desgaste de flanco.

More et al., 2006, destacam a ocorrência dos desgastes de flanco e de cratera como os principais tipos de desgaste na usinagem de aços endurecidos, e também citam o mecanismo de difusão, que é principal responsável pelo aparecimento do desgaste de cratera em altas velocidades. A utilização de coberturas melhora o desempenho da ferramenta por meio da redução da ação deste mecanismo, devido à maior dureza das camadas e à formação de barreiras difusivas.

Todas as arestas do inserto de cerâmica falharam com uma produção de no máximo dez peças. As falhas parecem ser uma consequência de trincas ocasionadas por combinação de choque térmico e choque mecânico. A cerâmica é um material frágil, e mostrou não trabalhar bem com o corte interrompido.

A ferramenta de metal duro P1 obteve melhores resultados que a de cerâmica, mas também não obteve um bom resultado, tendo as arestas quebradas precocemente.

A ferramenta de metal duro P2 apresentou desempenho superior às outras duas, como mostra a Tab. 4.6. As três arestas utilizadas chegaram ao fim dos testes, produzindo 20 peças sem falhar, sendo que duas delas apresentaram um desgaste extremamente baixo.

Tabela 4.6 - Comparação do desgaste x produção das duas pastilhas de metal duro.

DESGASTE DE FLANCO						
Quantidade de peças	Ferramentas de metal duro					
	Arestas P2			Arestas P1		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
5					0,266 mm	
10	0,082 mm	0,071 mm	0,052 mm	0,026 mm		0,165 mm
11						0,240 mm
17				0,214 mm		
20	0,105 mm	0,076 mm	0,064 mm			

 Fim de vida da ferramenta

4.3 Relação custo x benefício

A ferramenta de cerâmica não apresentou resultado satisfatório nos testes, mesmo com a variação dos parâmetros de entrada a produção foi inferior à obtida com as demais ferramentas.

A ferramenta de metal duro P1 teve um desempenho superior à de cerâmica, mas ainda assim não chegou a um bom resultado.

Já a ferramenta de metal duro P2 se mostrou como uma opção aceitável para a operação de torneamento duro com corte interrompido. Os testes foram finalizados com uma produção de vinte peças por aresta, e sem nenhuma falha, ou seja, ela ainda poderá processar mais operações de acabamento. Em função disso, o desvio padrão da vida dessa ferramenta, apresentado na Figura 4.4, é nulo.

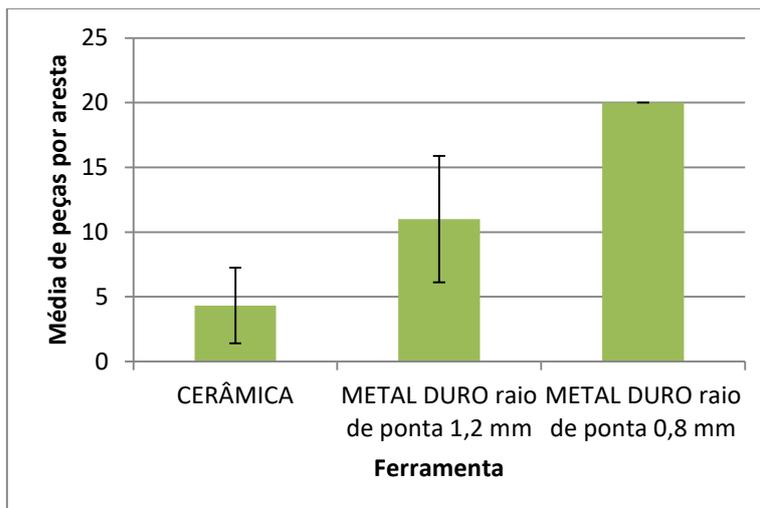


Figura 4.4 - Vida média de ferramenta.

A Figura 4.5 compara a evolução das rugosidades em função da quantidade de peças produzidas em cada uma das arestas testadas nas diferentes ferramentas de metal duro. Os valores iniciais da rugosidade foram calculados utilizando a Eq. 4.1

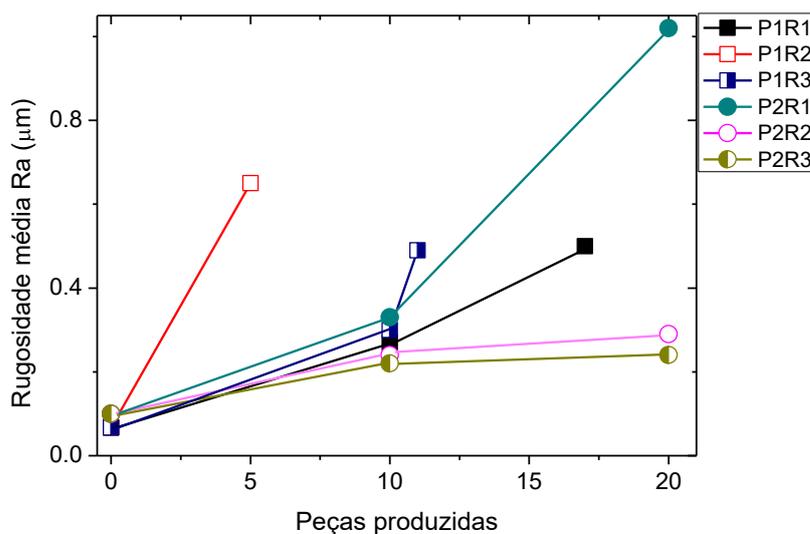


Figura 4.5 - Evolução da rugosidade nas peças usinadas pelas ferramentas de metal duro.

Comparando apenas o custo do inserto, sem levar em conta o tempo de usinagem, a ferramenta de metal duro mostrou que é opção mais econômica do que a de CBN, gerando uma economia de aproximadamente 20% por processo de acabamento em cada engrenagem produzida, e essa vantagem ainda pode crescer, considerando-se que não houve quebra em nenhuma das arestas utilizadas e ela continuará sendo utilizada até falhar.

5. CONCLUSÕES

Pastilhas de CBN precisam de altas velocidades de corte e baixos avanços para atingir condições de trabalho ótimas. Baixas velocidades de corte podem reduzir drasticamente sua vida útil. A correção dos parâmetros de processo permitiu um aumento médio de 1000% na vida útil da ferramenta.

Ferramentas cerâmicas não trabalham bem em usinagens com corte interrompido. Por ser um material frágil, os choques mecânicos ocasionados pela entrada e saída da ferramenta de corte são bastante prejudiciais. Além disso, por ter baixa condutividade térmica, também é prejudicada pelas variações de temperatura em função do tempo ativo/inativo de usinagem.

A pastilha de metal duro com grãos ultrafinos e raio de ponta de 0,8 mm foi a que apresentou os melhores resultados de produção e acabamento superficial, o que não é esperado quando somente a geometria da ferramenta é considerada. Apesar da relação inversa entre raio de ponta de ferramenta e rugosidade das peças fabricadas por torneamento significar, em teoria, que maiores raios de ponta resultariam em piores acabamentos, as rugosidades obtidas após o torneamento com ferramentas com raio de ponta de 0,8 mm foram significativamente menores que as obtidas com a ferramenta de raio de ponta 1,2 mm. No entanto, deve-se considerar que o estudo avaliou o acabamento superficial da última peça produzida com cada parâmetro (ou de cada dez peças produzidas, quando o fim da vida não foi atingido), de modo que parte significativa desse acabamento deve ser atribuída ao desgaste da ferramenta. Além disso, ferramentas com maior raio de ponta possuem maior tendência a apresentar *chatter*, o que também influi negativamente no acabamento superficial.

O desgaste de flanco medido na ferramenta de metal duro com raio de ponta de 0,8 mm é baixo. A ferramenta tem chance de ainda conseguir aumentar consideravelmente seu rendimento antes de falhar.

Ferramentas de metal duro não reagem bem a altas velocidades de corte em torneamento duro. A velocidade de corte deve ser média, com baixo avanço e baixa profundidade de corte.

O tempo de usinagem não foi levado em conta, mas analisando somente o custo de ferramental, a pastilha de metal duro com revestimento de PVD se mostrou como a melhor opção, apresentando um custo 20% menor do que a pastilha de CBN por peça finalizada.

Para futuros testes, recomenda-se que as operações de torneamento duro de acabamento da engrenagem sejam realizadas sem a utilização de fluido de corte, tendo grandes chances de apresentar melhores resultados. O uso de lubri-refrigerantes não é indicado para torneamento de materiais endurecidos. Além disso, por se tratar de uma usinagem interna, o fluido não chega à superfície de corte de maneira contínua e uniforme, e acaba aumentando a variação de temperatura da ferramenta. Isso pode aumentar a chance da ocorrência de trincas por choque térmico. O uso do fluido também prejudica a retirada de material, que seria facilitada pela diminuição da tensão ocasionada pelo aumento de temperatura em função do atrito. Parar de utilizar fluido de corte numa operação em que ele não é necessário diminuiria o custo do processo, traria benefícios ao meio ambiente e à saúde dos funcionários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAPIOU, S. J.; STEPHENSON, D. A.; **“Metal Cutting Theory and Practice”**, Taylor & Francis, Second Edition, 2006.

BARTARYAG, G.; CHOUDHURY, S. D. **“State of the art in hard turning”**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 53, 2012. 1–14.

BOUZAKIS, K. D.; MICHAILIDIS, N.; SKORDARIS, G.; BOUZAKIS, E.; BIERMANN, D.; M'SAOUBI, T. **“Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization”**, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 61, 703–723, 2012.

COSTA, A. F.; **“Análise Comparativa de Ferramentas Revestidas por PVD e CVD no Torneamento do Aço ABNT 8620”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

DAVIM, J. P.: **“A Note On The Determination Of Optimal Cutting Conditions For Surface Finish Obtained In Turning Using Design For Experiments”**, Journal of Materials Processing Technology, 116, p. 305-308. 2001.

DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M. **“Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools”**, Metals Technology, vol.9, p. 60-75. 1982.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **“Tecnologia da usinagem dos materiais”**, Artliber, 7ª edição, 2008.

DOGRA, M.; SHARMA, V.S.; SACHDEVA, A.; SURI, N.M.; DUREJA, J.S. **“Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review”**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. [S.l.], v. 11, n. 2, p. 341-358. 2010.

FERRARESI, D.; **“Fundamentos da Usinagem dos Metais”**, Blucher, 17ª reimpressão, 2017.

FERRARI, A.; **“Torneamento duro”**, disponível em <http://avozdaindustria.com.br/torneamento-duro>, 2017.

GRZESIK, W.; **“Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications”**, [S.l.]: Elsevier, 2008. p. 213-299.

ISO 3685, **“Tool-life testing with single-point turning tool”**, Second edition, 1993.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K.; **“Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes”**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54, 22-45, 2005.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W.; **“Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren”**, Springer, 547 p., 2008.

KOCH, K. F. **“Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens”**, p. 169. Dr.-Ing. Dissertation. RWTH-Aachen. Aachen, 1996.

KÖNIG, W.; BERKTOLD, A.; KOCH, K.-F.; **“Turning versus grinding - A comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies”**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, [S.l.], v.42, n. 1, p. 39-43, 1993.

LUO, S.; LIAO, Y.; TSAI, Y. **“Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools”**. Journal of Materials Processing Technology, 88, n. 1-3, 114-121, 1999.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; Da SILVA, M. B.; **“Teoria da usinagem dos materiais”**, Blucher, 3ª edição revista e atualizada, 2015.

MITSUBISHI. **“MITSUBISHI Tooling Technology, Level 2”**, MITSUBISHI Materials, 288 pags., 2006.

MORE, A.S.; JIANG, W.; BROWN, W.D.; MALSHE, A.P.; **“Tool wear and machining performance of CBN-TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel”**, Journal of Materials Processing Technology, [S.l.], v. 180, p. 253-262, 2006.

PEKELHARING, A. J.; **“Cutting tool damage in interrupted cutting”**, Wear, Volume 62, 1980.

SANCHES, H. A. B.; **“Avaliação do processo de usinagem com corte interrompido utilizando a análise de esforços e frequências.”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo, 2011.

SANDVIK COROMANT, Catálogo de ferramentas, disponível em <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/c-2940-137.pdf>

SANTOS, S. C., Sales, W. F. **“Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”**, Editora Artliber, p.p. 125 – 150. 2007.

SHAW, M. C.; **“Metal Cutting Principles”**, Oxford Series on Advanced Manufacturing, 2nd edition, 2005.

SORTINO, M.; TOTIS; G., PROSPERI, F.; **“Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture 61, 58-70, 2012.

SUYAMA, D. I.; **“Uma contribuição ao estudo do torneamento interno em aços endurecidos”**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 2014.

THIELE, J. D.; MELKOTE, S. N. **“Effect Of Cutting Edge Geometry And Workpiece Hardness On Surface Generation In The Finish Hard Turning Of AISI 52100 Steel”**, Journal of Materials Processing Technology, 94, p. 216-226. 1999.

TÖNSHOFF, H.K.; ARENDT, C.; BEN AMOR, R.; **“Cutting of hardened steel”**, CIRP Annals. [S.l.], v. 49, n. 2, p. 547-566. 2000.

ANEXO A

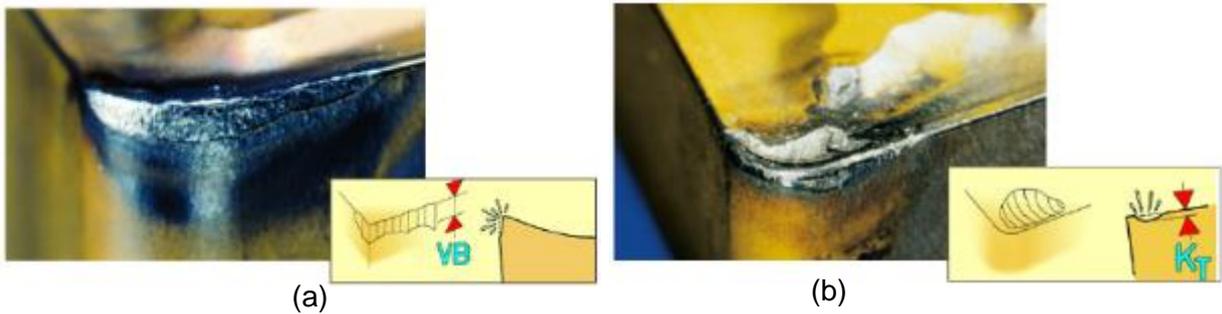


Figura A.1 - (a) Desgaste de flanco e (b) desgaste de cratera (Adaptado Sandvik Coromant, 2009).

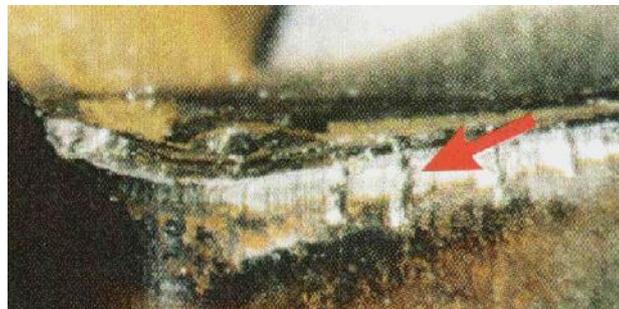


Figura A.2 - Trincas de origem térmica, perpendiculares a aresta de corte (Sandvik Coromant, 1999).

	Torneamento	Retificação	
		 Forma especial do rebolo	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Positiva ⊖ Neutra ⊙ Negativa ⊛ Não é possível realizar avaliação
Aspectos econômicos	⊕ / ⊖ *	⊕ / ⊖ *	Tempo de processamento
	⊕	⊖	Taxa de remoção de material
	⊕ / ⊕ **	⊕ / ⊕ **	Custo de aquisição
	⊖	⊕	Custo da ferramenta
Flexibilidade	⊕	⊖	Usinagem de múltiplas faces
	⊕	⊖ / ⊕	Usinagem de perfil
Aspectos ecológicos	⊕	⊖	Potência requerida
	⊕	⊖	Refrigeração
	⊕	⊖	Reciclagem dos cavacos
Qualidade	⊛	⊕	Qualidade do corpo de prova
	⊛	⊕	Confiabilidade do processo
	⊛	⊕	Integridade da superfície

* Dependendo da aplicação uma proporção de 1:10 até 10:1 é possível.

** Para propósitos específicos, um centro de usinagem ou de retificação são necessários.

Figura A.3 - Comparação entre o torneamento de materiais endurecidos e a retificação. (Adaptado de Koch, 1996).

APÊNDICE B

Imagens referentes à pastilha de metal duro P1:

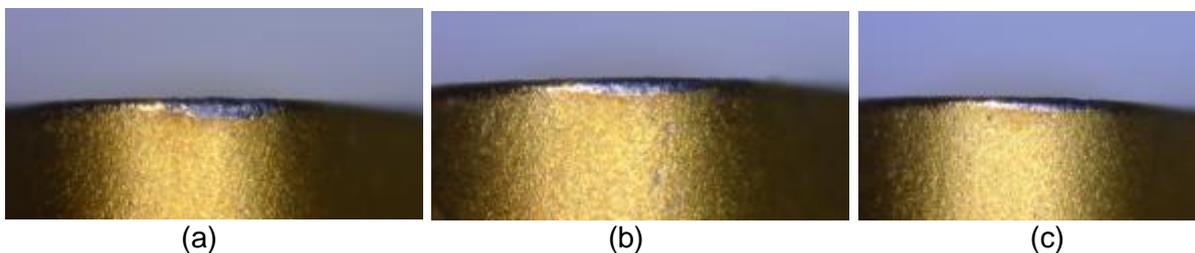


Figura B.1 - Desgaste de flanco nas arestas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), após usinar 10 peças.

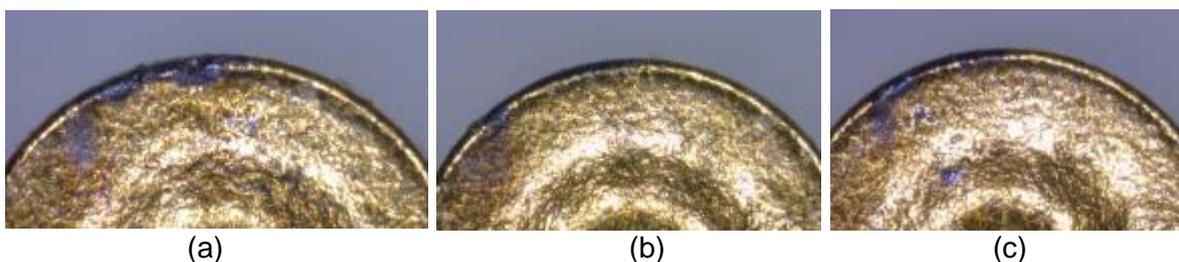


Figura B.2 - Microlascamento e delaminação do revestimento na aresta 1 (a), microlascamento nas arestas 2 (b) e 3 (c).

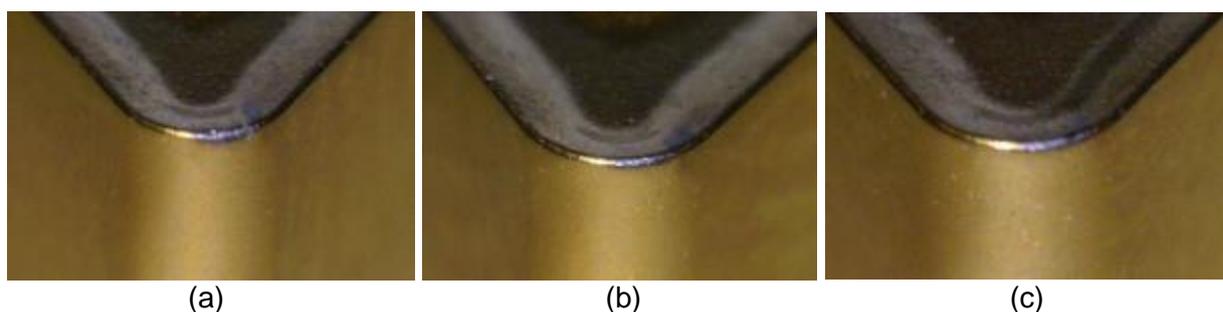


Figura B.3 - Vista isométrica do desgaste nas arestas 1, 2 e 3.

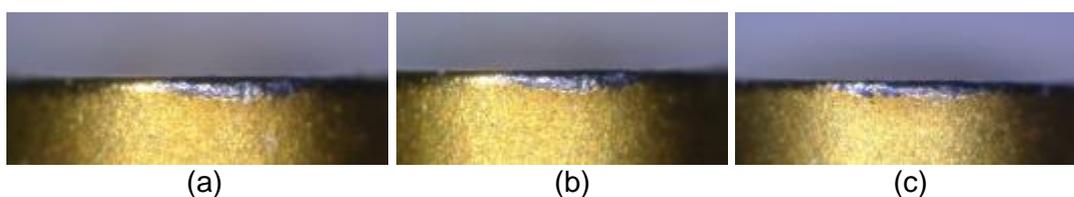


Figura B.4 - Desgaste de flanco nas arestas 1(a), 2 (b) e 3 (c), após usinar 20 peças.

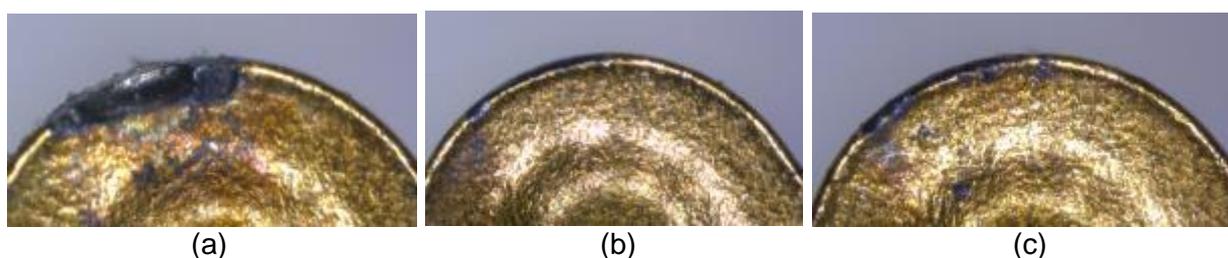


Figura B.5 - Desgaste na aresta 1 (a), delaminação nas arestas 2 (b) e 3 (c).

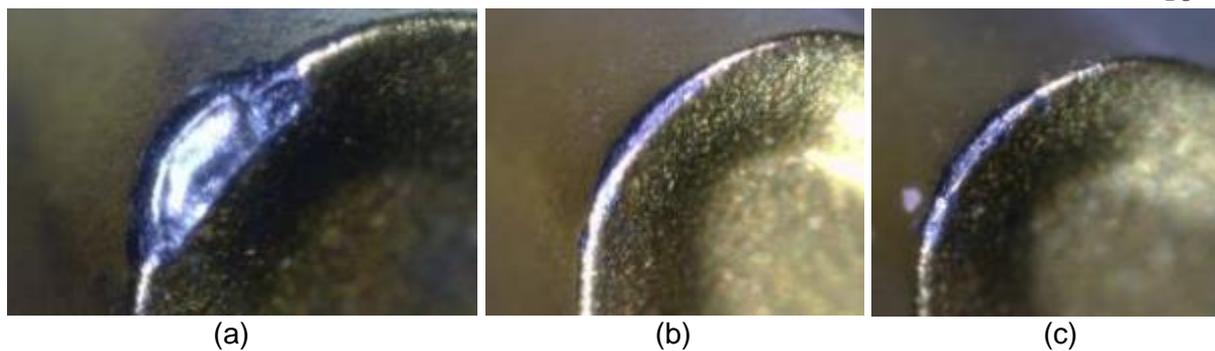


Figura B.6 - Vista isométrica arestas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

APÊNDICE C

Imagens referentes à pastilha de cerâmica:

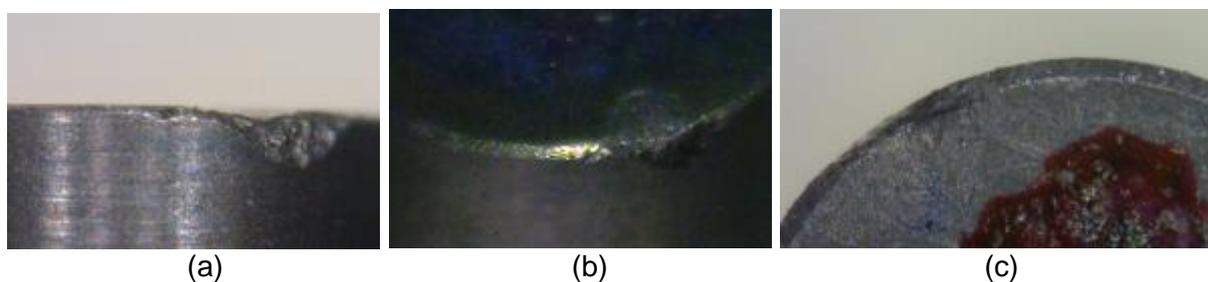


Figura C.1 - Aresta 1, lascamento e desgaste de cratera após usar três peças.

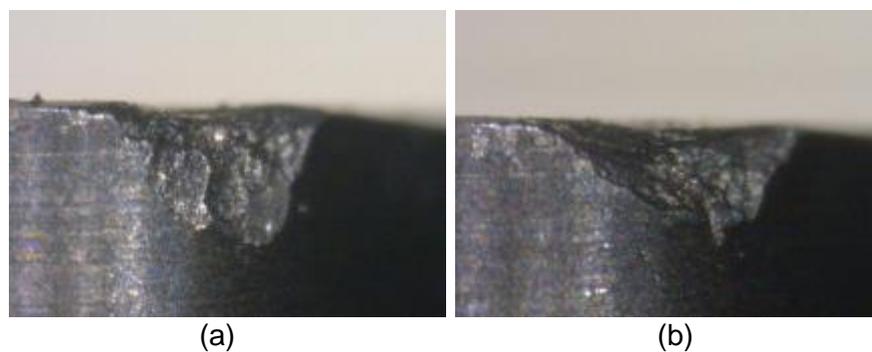


Figura C.2 - Arestas 2 (a) e 3 (b), quebra após usar cinco peças, flanco.

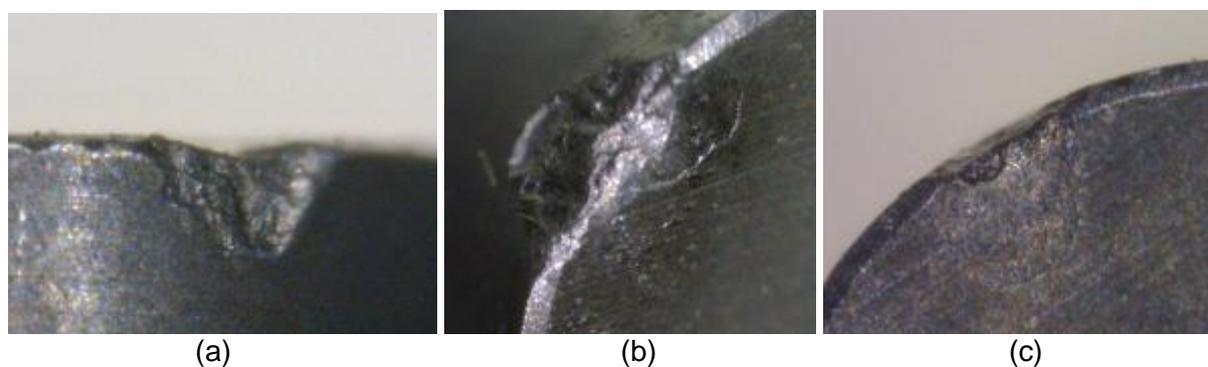


Figura C.3 - Aresta 4, lascamento e microlascamentos após usar duas peças.



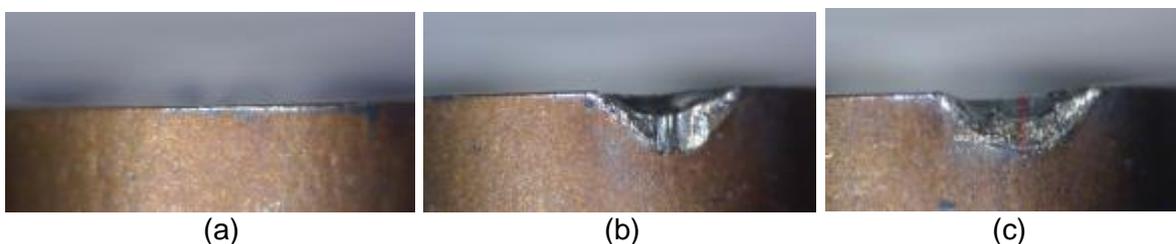
(a) (b) (c)
 Figura C.4 - Aresta 5, desgaste de cratera, após usinar 1 peça.



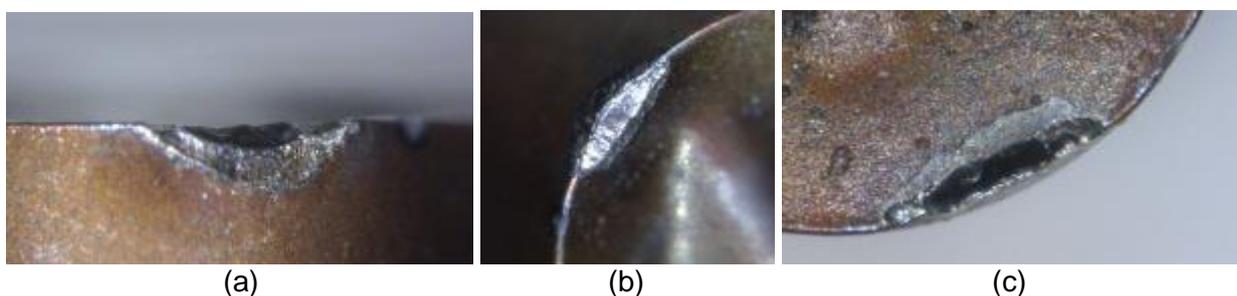
(a) (b) (c)
 Figura C.5 - Aresta 6, lascamento e microlascamentos após usinar 10 peças.

APÊNDICE D

Imagens referentes à pastilha de metal duro P1:



(a) (b) (c)
 Figura D.1 - Desgaste de flanco na aresta 1(a) após usinar 10 peças, desgaste de flanco na aresta 2 (b) após usinar 5 peças e quebra na aresta 3 (c) após usinar 11 peças.



(a) (b) (c)
 Figura D.2 - Desgaste de flanco (a) e lascamento (b)(c) na aresta 1, após usinar 17 peças