

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

BRUNA SIMÕES DA CUNHA

DESGASTES E AVARIAS EM INSERTO CERÂMICO NA USINAGEM DO AÇO LIGA AISI 8640

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

BRUNA SIMÕES DA CUNHA

**DESGASTES E AVARIAS EM INSERTO CERÂMICO NA USINAGEM DO AÇO
LIGA AISI 8640**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima

PATO BRANCO

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Desgastes e Avarias em Inseto Cerâmico na Usinagem do Aço Liga AISI 8640

Bruna Simões da Cunha

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 18/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Adelino Carlos Maccarini
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Tec. MsC. Vitor Baldin
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, por todo o apoio e auxílio recebidos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus. Agradeço à minha família por ser meu alicerce durante toda minha jornada, seja acadêmica ou pessoal. Agradeço também aos professores que, de alguma forma, contribuíram na conquista de novos conhecimentos, em especial ao professor orientador, o qual colaborou ativamente para a realização deste trabalho, ao técnico laboratorista e membro da banca Vitor Baldin, pelo esforço concentrado na obtenção das microscopias ópticas, e aos estagiários e ex-estagiários que contribuíram ativamente para a realização dos experimentos práticos. Agradeço também os colegas e amigos que se fizeram presente, em especial ao meu grande amigo Felipe Marques Piubelli. E não menos importante, agradeço a UTFPR/PB pelo ambiente proporcionado e toda estrutura compatível com a realização deste trabalho e obtenção do título profissional, e à instituição de ensino PUCPR, Campus Curitiba, mais precisamente o Laboratório de Caracterização e Ensaio dos Materiais, pela permissão do uso do laboratório para realização das microscopias.

EPÍGRAFE

May your efforts defy impossibilities, remember that the great things of man were conquered from what seemed impossible.
(CHAPLIN, Charlie).

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível. (CHAPLIN, Charlie).

RESUMO

CUNHA, Bruna Simões da. Desgastes e avarias em inserto cerâmico na usinagem do aço liga AISI 8640. 2018. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

O presente estudo aborda danos e avarias em inserto cerâmico misto na usinagem do aço baixa liga médio carbono AISI 8640. Os testes foram conduzidos através de uma metodologia delineada em especificações técnicas e embasada na literatura. Foram realizados testes de torneamento e medições de rugosidade superficial a cada passe executado, para que se pudesse estreitar a relação entre as alternâncias de parâmetros de corte e a integridade superficial da ferramenta. De acordo com os resultados, foi observado que o aumento do valor da rugosidade média aritmética é diretamente proporcional ao aumento da profundidade de corte e da rotação, bem como da taxa de remoção de material, agravando a qualidade superficial da peça, assertiva já corroborada pela literatura e comprovada através deste estudo. Além disso, foi observado que os principais desgastes associados à ferramenta cerâmica na usinagem do aço baixa liga foi desgaste de flanco e cratera, ditados por fenômenos como adesão e arrastamento de material sobre a superfície da ferramenta.

Palavras-chave: Usinagem. Torneamento. Aço baixa liga. AISI 8640. Ferramenta cerâmica. Cerâmica mista. Desgaste.

ABSTRACT

CUNHA, Bruna Simões da. Wear and failures in ceramic cutting tool when machining AISI 8640 low alloy steel. 2018. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

The present paper approaches damages and failures in mixed ceramic cutting tool when machining AISI 8640 medium-carbon low-alloy steel. Tests were conducted by a well-graded methodology made according to technical information and the literature. Machining tests and superficial roughness measurements in each pass were executed, so the relations between interchange of cutting parameters and the superficial integrity of the tool could be narrowed. According to the results, it was noticed that the increase of arithmetic mean roughness is directly proportional to the increase of feed rate and cutting depth, as well as material removal rate, impairing surface quality, as seem and proved by literature. Besides, it was noticed that the main types of wear associated to the ceramic cutting tool when machining low alloy steel were flank wear and crater wear, due to adhesion and material dragging on its surface.

Keywords: Machinability. Turning. Low alloy steel. AISI 8640. Ceramic cutting tool. Mixed ceramics. Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação de propriedades de materiais para ferramentas de corte ...	17
Figura 2 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte	23
Figura 3 – Principais áreas de desgaste em um inserto de corte.....	24
Figura 4 – Classificação das cerâmicas	27
Figura 5 – Composição química das ligas AISI 8640 e SAE 1045	36
Figura 6 – Propriedades mecânicas dos aços AISI 8640 e SAE 1045.....	36
Figura 7 – Nível de tenacidade do inserto cerâmico CW2015	41
Figura 8 – Ilustração do inserto cerâmico	41
Figura 9 – Parâmetros para inserto cerâmico	42
Figura 10 – Especificações dimensionais para suporte MTJN – 93°	43
Figura 11 – Superfície original do corpo de prova.....	44
Figura 12 – Superfície de referência	45
Figura 13 – Início do processo de sangramento	46
Figura 14 – Representação do corte final do disco de prova	47
Figura 15 – Faceamento do disco de prova	48
Figura 16 – Medição de dureza no disco de prova.....	48
Figura 17 – Identificação das indentações na face do disco de prova	49
Figura 18 – Medição da rugosidade superficial média do corpo de prova	51
Figura 19 – Representação da rugosidade média.....	51
Figura 20 – Direção de corte do inserto no teste preliminar	58
Figura 21 – Inserto cerâmico apresentando falha catastrófica.....	61
Figura 22 – Microscopia do raio da ponta do inserto fragmentado.....	62
Figura 23 – Microscopia da face primária de corte do inserto fragmentado.....	62
Figura 24 – Microscopia da face primária de corte do inserto da primeira série de ensaios.....	64
Figura 25 – Microscopia da superfície de saída do inserto da primeira série de ensaios	65
Figura 26 – Face primária de corte do inserto da segunda série de ensaios	66
Figura 27 – Superfície de saída do inserto da segunda série de ensaios	67
Figura 28 – Raio da ponta do inserto da segunda série de testes	68

Figura 29 – Qualidade superficial referente ao valor médio aproximado de 0,600µm	69
Figura 30 – Face primária de corte do inserto da terceira série de testes	70
Figura 31 – Região do raio da ponta do inserto da terceira série de testes	71
Figura 32 – Microscopia da face primária de corte do inserto da quarta série de ensaios	72
Figura 33 – Superfície de folga do inserto da quarta série de testes	73
Figura 34 – Face primária de corte do inserto da quinta série de ensaios	75
Figura 35 – Superfície de saída do inserto da quinta série de ensaios	76
Figura 36 – Face primária de corte do inserto da sexta série de ensaios	77
Figura 37 – Raio da ponta do inserto da sexta série de ensaios	78
Figura 38 – Superfície de saída do inserto da sexta série de ensaios	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço liga AISI 8640	34
Tabela 2 – Dureza do disco de prova.....	49
Tabela 3 – Rugosidade média no corpo de prova.....	52
Tabela 4 – Tabela de controle de parâmetros de corte	52
Tabela 5 – Parâmetros de usinagem para a primeira série de testes	54
Tabela 6 – Parâmetros de usinagem para a segunda série de testes	55
Tabela 7 – Parâmetros de usinagem para a terceira série de testes	55
Tabela 8 – Parâmetros de usinagem para a quarta série de testes	56
Tabela 9 – Parâmetros de usinagem para a quinta série de testes	56
Tabela 10 – Parâmetros de usinagem para a sexta série de testes.....	57
Tabela 11 – Parâmetros de usinagem para o teste preliminar com o inserto cerâmico CW2015	57
Tabela 12 – Resultados obtidos no teste preliminar.....	60
Tabela 13 – Resultados obtidos na primeira série de testes	63
Tabela 14 – Resultados obtidos na segunda série de testes	65
Tabela 15 – Resultados obtidos na terceira série de testes	68
Tabela 16 – Resultados obtidos na quarta série de testes.....	71
Tabela 17 – Resultados obtidos na quinta série de testes	74
Tabela 18 – Resultados obtidos na sexta série de testes	76

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de corte [mm]
APC	Aresta postiça de corte
d	Diâmetro do corpo de prova [mm]
f	Avanço [mm/rev]
n	Rotação [rpm]
Ra	Rugosidade média aritmética [μm]
TRM	Taxa de remoção de material [mm^3/min]
v_c	Velocidade de corte [m/min]
v_f	Velocidade de avanço [mm/min]
Δt	Intervalo de tempo [s]
φ_i	Diâmetro inicial [mm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivos Gerais	19
1.2.2	Objetivos Específicos	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	DESGASTES E MECANISMOS DE DESGASTE	22
2.2	FERRAMENTAS CERÂMICAS	26
2.3	AÇO LIGA AISI 8640.....	33
3	METODOLOGIA	40
3.1	UNIFORMIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO CORPO DE PROVA	44
3.2	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS NO CORPO DE PROVA.....	45
3.3	REALIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE USINAGEM	52
3.4	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS NA FERRAMENTA DE CORTE	58
4	RESULTADOS.....	60
5	CONCLUSÕES	79
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A usinagem caracteriza-se pela modificação de geometria de uma peça a partir da remoção de material da mesma através de entidades denominadas cavacos. Este processo de fabricação surgiu a partir da necessidade de manufatura de objetos, e veio evoluindo juntamente com o homem desde sua mais remota manifestação. Entretanto, avanços mais significativos foram observados no final do século XVII, com o início do desenvolvimento de máquinas industriais e, mais ainda, com a Revolução Industrial no século XVIII. A notoriedade e o aperfeiçoamento de máquinas operatrizes, materiais e também do conhecimento atrelado ao processo ao longo do tempo permitiram ao homem a extensa capacidade de produção com um alto nível de conformidade com padrões e normas estabelecidos, além de incontáveis geometrias em inúmeros tipos de materiais existentes.

Atualmente, há uma infindável gama de materiais que podem ser utilizados para diversas aplicações. Desde aços com composição mais simples até superligas, as propriedades mecânicas associadas a cada um deles determinam sua utilização e características desejáveis.

Tendo em vista o conceito do processo de fabricação vigente, vale salientar a importância da grandeza tecnológica denominada usinabilidade, que pode ser entendida como sendo o grau de dificuldade de se usinar um determinado material, e ela possui dependência do estado metalúrgico da peça, dureza, propriedades mecânicas devido à sua composição química, operações efetuadas previamente e eventual encruamento. Além dessas características, a usinabilidade também é dependente das condições de usinagem oferecidas, bem como características de ferramenta, tipo de operação a ser realizada, condição de lubrificação e refrigeração, rigidez do sistema, entre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Portanto, a análise e compreensão da usinabilidade são de suma importância para a obtenção de resultados requeridos e para a melhoria contínua do processo de produção, garantindo, assim, a qualidade final do produto, bem como economia de variáveis diversas como, por exemplo, tempo de fabricação, ferramenta, custos e matéria-prima.

Quando se trata da realização de um procedimento de usinagem, é importante ter conhecimento do tipo de processo que será realizado, bem como da ferramenta a ser utilizada e o material a ser trabalhado, gerando, desta forma, base

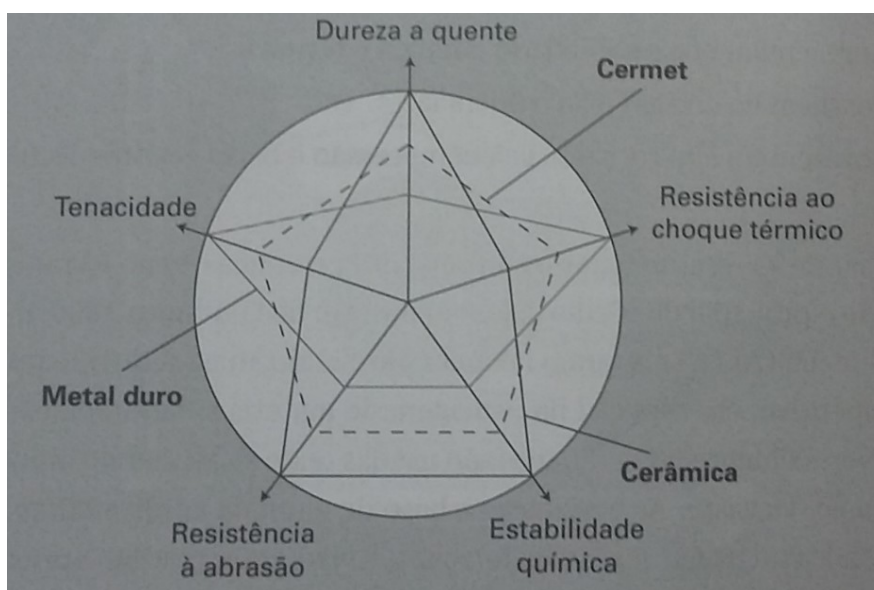
para o cálculo dos parâmetros de corte, além de reconhecer possíveis efeitos na mecânica do processo, como eventuais desgastes e avarias na ferramenta de corte.

Os materiais utilizados na fabricação de ferramentas de corte caracterizam-se por ser mais duros e mecanicamente mais resistentes do que a peça de trabalho, associados a valores de tenacidade suficientes para suportar os choques e impactos provenientes do processo, o que pode se tornar um desafio quando se trata do balanço dessas propriedades, visto que elas podem ser inversamente proporcionais a outras (MACHADO et al., 2009).

Usualmente são utilizados materiais metálicos, cerâmicos e uma combinação de ambos para a confecção de ferramentas de corte, cada qual apresentando um conjunto de características desejado para determinada aplicação industrial. Enfatizando o conceito e aplicabilidade do uso de ferramentas cerâmicas, pode-se dizer que elas são compostas por elementos metálicos e não metálicos, geralmente na forma de óxidos, nitretos e carbonetos, podendo ser classificadas de acordo com sua base, alumina (Al_2O_3) ou nitreto de silício (Si_3N_4) (MACHADO et al., 2009).

As características evidenciadas nas ferramentas cerâmicas devido às suas propriedades mecânicas contribuem para a usinagem de materiais como aços endurecidos, superligas e ferros fundidos, sendo estes os mais indicados. Em geral, suportam elevadas temperaturas por serem materiais refratários, exibem elevada resistência ao desgaste, possuem baixa condutividade térmica e apresentam bons índices de resistência à compressão e estabilidade química, entre outras propriedades desejáveis, podendo ser observada a comparação de propriedades com outros tipos de materiais para ferramentas na Fig. 1.

Figura 1 – Comparação de propriedades de materiais para ferramentas de corte



Fonte: Machado et al., 2009, p. 210.

Com relação ao elemento a ser usinado, o indicado é a escolha adequada entre material de trabalho e ferramenta, para que os resultados desejados de acordo com critérios de usinagem possam ser alcançados, combinando harmonicamente parâmetros de usinagem e qualidade de acabamento; entretanto, a associação entre ferramenta e peça, quando não orientada dentro de especificações técnicas já estabelecidas, abrem espaço para a exploração científica. Devido a isso, a não utilização de materiais como aços endurecidos e ferros fundidos na usinagem com insertos cerâmicos estimula o estudo quanto à abrangência de aplicação da ferramenta.

Tendo em vista a influência da escolha da ferramenta e material a ser trabalhado e consequentes danos à integridade superficial e mecânica da mesma, o foco do presente trabalho deu-se pela associação do procedimento de torneamento do aço liga AISI 8640 com a utilização de insertos cerâmicos mistos, também conhecidos como cerâmica preta, para investigação de eventuais desgastes.

1.1 MOTIVAÇÃO

A utilização de ferramentas cerâmicas pode ser justificável através de inúmeros benefícios que a mesma proporciona para o processo requerido, além das propriedades necessárias e exigidas para a realização de determinada usinagem.

Além das características ímpares citadas anteriormente que o material apresenta, pode-se dizer que a conveniente associação dessas propriedades mecânicas garante um tempo de operação menor, culminado pelas altas velocidades de corte admissíveis pela ferramenta, elevando, desta forma, o índice de produtividade, este sendo explicado pelo amolecimento do material pela elevada temperatura que a operação com cerâmica alcança.

Em adição, ao efetuar a análise dos processos industriais de manufatura de uma forma geral, pode-se dizer que a usinagem é, de longe, o processo mais amplamente efetuado e, conseqüentemente, a quantidade e a diversidade de materiais residuais e emissões é significativa. Dentro desse âmbito da poluição, é relevante compreender o impacto que tais resíduos causam no ambiente, visto que a utilização de fluidos refrigerantes/lubrificantes é, atualmente, uma das grandes fontes causadoras de problemas ecológicos (DIAS et al., 2001). Devido a isso, o desenvolvimento, armazenamento, utilização, reciclagem e descarte dos mais complexos fluidos obrigatoriamente precisam atender, de uma maneira rigorosa, às normas de proteção ambiental e de saúde. Os custos associados a esses procedimentos são elevados, o que incentiva cientistas a desenvolverem ferramentas que não necessitem do uso de fluidos refrigerantes (ÁVILA; ABRÃO, 1999). Tendo isso em vista, pesquisas tem sido realizadas para o desenvolvimento de ferramentas de corte que possam suportar as severas condições de operação junto à aresta de corte, e com isso, as ferramentas cerâmicas tem sido candidatas para essas aplicações com uso reduzido ou nulo de fluidos de corte, beneficiando, assim, o meio ambiente (VLEUGELS, 2006). É conhecido que as ferramentas cerâmicas à base de alumina tem sido cada vez mais utilizadas em operações a seco a elevadas velocidades, o que reforça a justificativa de seu uso neste trabalho, pois além das propriedades mecânicas solicitadas, não será necessária a utilização de fluidos refrigerantes, reduzindo custos e eventuais impactos ao ambiente.

No que compete às propriedades dos materiais, cabe ressaltar que, pra determinadas aplicações, os aços baixa liga são candidatos favoráveis em comparação com os aços carbono, pois a adição, mesmo que pequena, de elementos de liga confere ao material características mais desejáveis e aprimoradas. Para o aço baixa liga médio carbono AISI 8640, cujos metais de liga primária são o cromo, o níquel e o molibdênio, suas propriedades básicas (já comentadas previamente e ressaltadas nesta seção) são singulares. Ele é conhecido por sua resistência ao

desgaste, boa tenacidade e ductilidade, pelo grau que pode ser endurecido e pela sua durabilidade, o que permite seu uso em uma ampla gama de projetos. Tendo em vista tais características mais aprimoradas, das quais não predominam nos aços comuns de igual concentração de carbono, é visível a vantagem de utilização da liga, o que, na maior parte dos casos, justifica a relação custo/benefício.

Partindo para o âmbito científico de pesquisas e experimentos voltados à usinagem de materiais e à utilização de diferentes tipos de ferramentas de corte, numerosas combinações podem ser realizadas a fim de se estudar e obter a melhor metodologia de produção, além de grandezas de corte adequadas. Tendo em vista esses mesmos experimentos já realizados, não é possível obter informações específicas acerca da utilização de cerâmicas pretas em aços baixa liga, muito menos das consequências que essa combinação proporciona, tanto relacionadas à integridade superficial da ferramenta de corte quanto ao material.

O estudo realizado neste trabalho se apresenta como uma análise relevante e de grande valia quando se trata da obtenção dos efeitos superficiais da ferramenta de corte cerâmica utilizando tal processo de fabricação, justificado pela utilização de um material não indicado para o tipo de inserto vigente. A associação de uma ferramenta cerâmica mista e um aço baixa liga gera consequências ainda não avaliadas apropriadamente na esfera científica, o que torna o estudo expressivo e agrega conhecimento técnico e científico.

1.2 OBJETIVOS

Abaixo encontram-se as definições dos objetivos geral e específico associado ao presente trabalho.

1.2.1 Objetivos Gerais

Verificar desgastes e avarias em inserto cerâmico preto (ou misto) na usinagem do aço baixa liga AISI 8640 para obtenção de condições de avaliação da integridade superficial do inserto para saber se é possível efetuar a usinagem em material de baixa liga, este não sendo indicada sua utilização, além de analisar a viabilidade de uso do aço em questão em substituição ao aço carbono comum.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar experimentos mecânicos no corpo de prova, sendo este o aço AISI 8640, para coleta de dados e obtenção das propriedades mecânicas para comparação das características com o inserto a ser utilizado, sendo este feito de cerâmica preta.
- Realizar procedimentos de usinagem no Laboratório de Usinagem do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, utilizando os materiais disponíveis supracitados, com a variação de grandezas de corte para alcançar efeitos desejados e diferentes resultados para comparação.
- Reforçar a assertiva do aço liga AISI 8640 como sendo alternativa ao aço médio carbono.
- Analisar as informações coletadas ao longo dos experimentos.
- Executar ensaios de micrografia óptica para verificação de eventuais danos e desgastes no inserto cerâmico.
- Desenvolver estudo e conclusão acerca da integridade superficial da ferramenta de corte.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco relevantes áreas para entendimento do estudo realizado. Na primeira seção está contida a introdução do trabalho, bem como a motivação para o presente estudo, os objetivos gerais e específicos. Aqui é feita a apresentação do problema e é possível tomar conhecimento de informações relevantes para a execução do trabalho.

Na segunda seção encontra-se a revisão bibliográfica referente ao assunto abordado ao longo do trabalho.

Na terceira seção pode-se observar a metodologia utilizada para desempenhar o estudo vigente, evidenciando os materiais e o processo de investigação.

Na quarta seção estão contidos os resultados referentes ao exercício do procedimento e as discussões realizadas.

Na quinta e última seção encontram-se as conclusões quanto ao progresso verificado, bem como sugestões para realização de outros experimentos associados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESGASTES E MECANISMOS DE DESGASTE

Dentro do âmbito de estudo das ferramentas de corte, dentre os vários aspectos e mecanismos passíveis de se suceder durante a operação de usinagem, cabe destacar a ocorrência de avarias e desgastes na superfície de corte da mesma. De acordo com a literatura, os conceitos de desgaste e avaria são distintos, pois a intensidade exercida e o efeito que cada uma dessas definições ocasiona na ferramenta de corte podem ser caracterizados isoladamente. Avaria é o fenômeno que ocorre de maneira súbita e impremeditável, implicando no seu estrago integral ou levando à perda de uma quantidade significativa de material, inviabilizando, desta forma, seu uso, e assim comprometendo a continuidade do processo de corte. Já a definição de desgaste é a “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”, em conformidade com a Norma ABNT ISO 3685/1993. (MACHADO et al., 2009).

Independente da composição química e conseqüentes propriedades mecânicas de ambos material e ferramenta, é habitual, portanto, verificar o desgaste natural e uniforme da superfície devido ao atrito na interface ferramenta-peça, caracterizada, entre outras palavras, pela perda de massa e conseqüente alteração na geometria. Além disso, é possível verificar a ocorrência de falhas mais severas, como lascamento, trincamento e até quebra da ferramenta, conseqüentes da escolha equivocada das variáveis de corte especificadas no processo, caracterizando, assim, a avaria da ferramenta e exigindo, desta forma, a substituição da mesma.

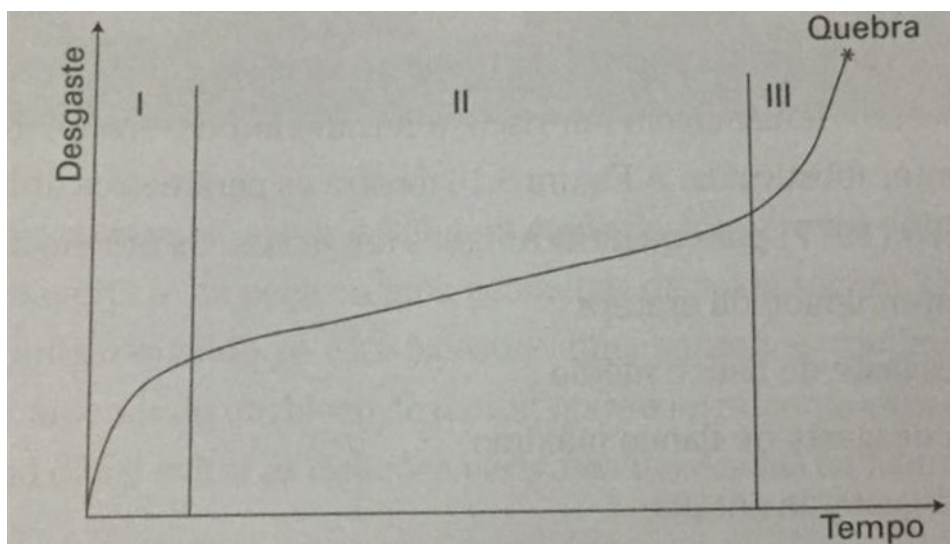
O desgaste de uma ferramenta de corte pode ser causado devido a diferentes mecanismos presentes, sendo os mais comuns a aresta postiça de corte, abrasão mecânica, aderência, difusão e oxidação, conseqüentes da influência térmica ou mecânica do procedimento. O desgaste geralmente está associado a uma mudança de geometria da ferramenta devido à retirada de material e, também, à deformação plástica, caracterizada pelo deslocamento do material, este sendo dificilmente encontrado nas ferramentas cerâmicas.

Independentemente do número associado à tenacidade de uma ferramenta de corte, ela sempre estará sujeita a desgastes em sua estrutura, caracterizando, assim, um desgaste progressivo nas superfícies primárias e secundárias de corte.

Antes que seja necessário, caso possível, o reafinamento da aresta de corte, o tempo associado até que esse processo ocorra é denominado como vida da ferramenta de corte, e o entendimento dos processos de desgaste é relevante para determiná-lo, a fim de manter o processo produtivo dentro de condições adequadas, de acordo com critérios convenientes ao mesmo (MACHADO et al., 2009).

O desgaste, em geral, segue uma tendência de evolução representada por três estágios de progresso, podendo ser visualizados na Fig. 2: o estágio I (estágio primário ou inicial) caracteriza-se pela adequação da cunha cortante ao processo corrente, evidenciando um desgaste acelerado, seguido por uma taxa menor do que a apresentada inicialmente; o estágio II (estágio secundário ou progressivo) caracteriza-se pela taxa constante de desgaste, indicada pela completa adequação da ferramenta ao processo; e o estágio III (estágio terciário ou catastrófico), onde se observa um acentuamento dessa taxa devido a níveis elevados de desgaste, os quais auxiliam grandezas como temperatura e tensões envolvidas a, eventualmente, levar ao colapso da ferramenta (MACHADO et al, 2009).

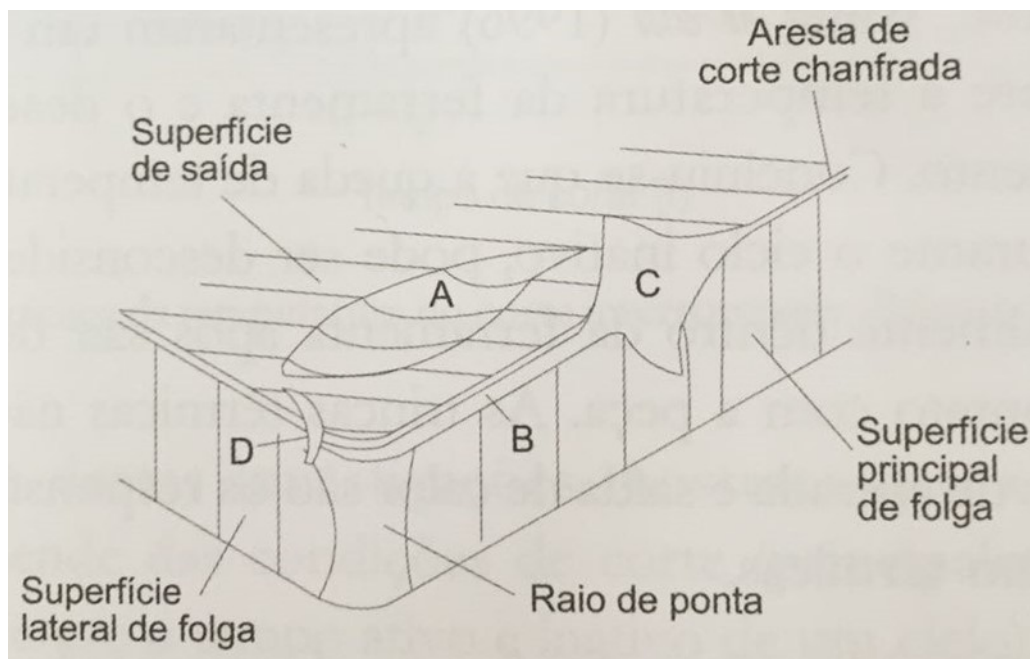
Figura 2 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte



Fonte: Machado et al., 2009, p. 248.

Diversos são os tipos de desgaste e avarias que podem se suceder em uma ferramenta devido aos mecanismos de desgaste, porém os principais podem ser observados na Fig. 3.

Figura 3 – Principais áreas de desgaste em um inserto de corte



Fonte: SANTOS, S. C.; SALES, W. F., 2007.

Pela figura acima, distingue-se as formas de desgaste como desgaste de cratera (região A), desgaste de flanco (região B) e desgaste de entalhe (regiões C e D). O desgaste de cratera é caracterizado pelo aparecimento de uma pequena depressão devido a elevadas temperaturas geradas no processo pelo atrito na interface cavaco-ferramenta. A ocorrência deste tipo de desgaste está associada a mecanismos de desgaste denominados difusão (transferência de átomos de um material para outro) e adesão, e a posição de ocorrência na superfície varia de acordo com o material usinado, sendo normalmente observada atrás da aresta de corte. O crescimento deste tipo de desgaste gera a quebra da ferramenta quando se encontra com o desgaste frontal, também conhecido por desgaste de flanco. O desgaste de flanco, em contrapartida, decorre da perda do ângulo de folga da ferramenta, incentivado pela elevação da velocidade de corte, aumentando, desta forma, a área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, contribuindo para a ocorrência de mais atrito na região. Por fim, acredita-se que o desgaste de entalhe é dado sob condições e circunstâncias específicas de operação, gerando uma fissura pela formação da aresta postiça de corte (APC), na extremidade livre do cavaco, o que leva ao enfraquecimento da aresta (SANTOS; SALES, 2007).

Com relação aos mecanismos de desgaste, os quais são fenômenos que auxiliam no aparecimento de regiões de desgaste na superfície da ferramenta, faz-se

relevante elucidar o conceito de aresta postiça de corte (APC), abrasão e attrition (fenômeno que associa a aderência e o arrastamento de material), mecanismos estes responsáveis pelas principais áreas de desgaste explanadas anteriormente.

A APC caracteriza-se pela formação de uma camada de cavaco sobre a superfície de contato entre ferramenta e peça, aderido à aresta de corte, prejudicando a operação de usinagem. Ocorre em processos onde a velocidade de corte não é elevada, que contribui para a soldagem da parte inferior do cavaco em contato com a ferramenta, que está sob condições de pressão de corte na zona de aderência, e que com o contínuo fluxo de cavaco sobre essa camada, deforma-se e se encrua. Devido a essa adesão e encruamento do material, a porção de material age como aresta de corte, prejudicando sensivelmente o acabamento superficial da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

O mecanismo denominado abrasão envolve a perda de material por microcortes, microlascamentos ou microsulcamentos, causado por partículas de alta dureza relativa, partículas estas podendo ser provenientes do material da peça (como óxidos, carbonetos e carbonitreto) ou da própria ferramenta. Este fenômeno frequentemente se manifesta na usinagem com cerâmicas puras e mistas, além de insertos revestidos (SANTOS; SALES, 2007).

Na literatura, o mecanismo de desgaste convencional attrition é também conhecido por adesão, fenômeno este igualmente característico de baixas velocidades. Nele, o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta é irregular, realizando a remoção de fragmentos microscópicos da face do inserto e os arrastando junto ao fluxo de material adjacente à interface. Por ser um mecanismo que se sucede ao nível granular, o fenômeno é favorecido pelas ferramentas de granulação mais fina, e as áreas desgastadas possuem uma aparência áspera, diferentemente da difusão, a qual apresenta uma aparência lisa, devido à interação atômica entre peça e ferramenta (MACHADO et al, 2009).

O estudo das avarias e dos mecanismos de desgaste, como verificado, possui uma representatividade elevada, pois seu entendimento contribui para tomadas de decisão de caráter corretivo, além do prolongamento da vida útil da ferramenta, diminuindo, desta forma, custos associados a ferramental e paradas de máquina, contribuindo para um índice de produtividade expressivo.

2.2 FERRAMENTAS CERÂMICAS

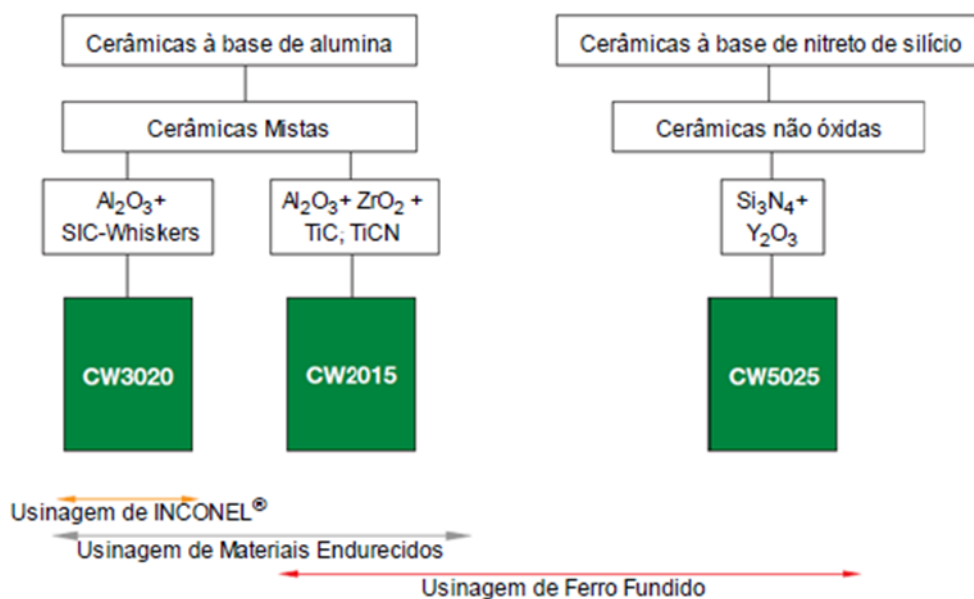
O estudo da usinagem foca nas características do comportamento entre peça e ferramenta, o qual influencia na eficiência e qualidade da operação de corte. Através desse estudo, feito ao longo dos anos, a tecnologia da usinagem tem sido aperfeiçoada pelos ramos industriais que apresentam interesse nesse processo. Conduzida também por extensos estudos, a produtividade tem sido melhorada através da substituição de ferramentas de aço carbono por outros tipos de materiais de corte, os quais permitiram um aumento significativo nas velocidades de corte. As propriedades mecânicas necessárias para operações de usinagem a elevadas velocidades tem levado ao desenvolvimento de materiais mais avançados, e esse desenvolvimento avança até os dias atuais com o uso de ferramentas cerâmicas (SHEHAB; MUBARAK, 2008).

As ferramentas de corte constituídas de material cerâmico são consideradas ferramentas recentes, utilizadas desde a década de 1950, porém é observado só na década de 1980 que significativas evoluções foram realizadas acerca de suas propriedades, passando a ser considerada como sendo um material não desprezível no mercado (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Essas ferramentas foram primariamente utilizadas para acabamentos de alta velocidade em ferros fundidos e aço para indústria automobilística, e o desenvolvimento de sua composição para melhorias nas propriedades termomecânicas foi realizado adicionando carbeto de titânio (TiC) à matriz de óxido de alumínio, também conhecido como alumina (Al_2O_3). Em geral, cerâmicas baseadas nesses elementos contêm entre 25 e 40% de carbeto de titânio, concedendo ao material uma coloração preta, daí sendo chamada de cerâmica preta (ISAKOV, 2009).

A seleção da ferramenta de corte para o presente estudo deu-se pela escolha de insertos de cerâmica mista (ou preta), estes caracterizados pela presença dos seguintes elementos: óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de zircônio (ZrO_2), carbeto de titânio (TiC) e carbonitreto de titânio (TiCN). São indicadas majoritariamente para semi-acabamentos e acabamentos de materiais como aços endurecidos e ferro fundido. Na Fig. 4 é possível observar as diferentes aplicações das diferentes cerâmicas.

Figura 4 – Classificação das cerâmicas



Fonte: Adaptado de Widia Master Catalog 2017.

Ferramentas cerâmicas à base de alumina possuem propriedades mecânicas e químicas únicas, especialmente em processos com elevada temperatura, como elevada resistência ao desgaste e dureza e boa inércia química quando utilizada em aços e outros materiais. No entanto, por se apresentar frágil e suscetível a falhas, a aplicação das cerâmicas à base de alumina possui uma extensão reduzida (PELLEG, 2014 apud CHENG et al., 2017).

A capacidade de corte a elevadas velocidades das ferramentas à base de alumina, comparadas com as ferramentas convencionais, é provavelmente devido a duas propriedades da alumina, sendo a primeira a manutenção de sua elevada resistência a altas temperaturas, e a segunda, alta resistência à reação com aços e ferro fundido (TRENT, 1979).

Essas propriedades químicas e mecânicas oferecem à ferramenta cerâmica melhores taxas de remoção de material, extensão da vida útil da ferramenta e a capacidade de usinar corpos de prova de aços endurecidos (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2005). Elas são comumente menos utilizadas para a usinagem de aços comuns devido à incidência de falha prematura por fratura, a menos que as precauções necessárias para manter a rigidez do sistema sejam tomadas e, assim, prevenir eventuais danos por impacto à aresta de corte (TRENT, 1979). Em suma, as cerâmicas mistas são uma das duas ferramentas mais recomendadas para acabamento em peças endurecidas (HRC 50-65) e ferro fundido, além das

ferramentas de PCBN (GRZESIK, 2008). Todas essas características têm auxiliado sua utilização em procedimentos que requerem tempos de execução mais longos e onde o fluxo de trabalho se beneficiaria com o amolecimento do material devido à elevada temperatura (KUZLER, 2012).

As ferramentas cerâmicas revelam-se apropriadas para usinagem de alta velocidade a seco (do inglês high speed dry machining – HSDM), sendo este processo caracterizado por ser uma das mais avançadas técnicas de manufatura, a qual em comparação com processos convencionais, é ambientalmente amigável e alcança maiores produtividades de usinagem e precisão superior, juntamente com qualidade superficial das peças trabalhadas. Características como tolerância a altas temperaturas e estabilidade química promovem às cerâmicas esse uso particular. Entretanto, o significativo coeficiente de atrito entre ferramenta e peça pode resultar em uma geração excessiva de calor na superfície, e como consequência, desgastes de origem térmica com redução da vida útil da ferramenta. Devido a essas contrapartidas, é necessário avaliar considerações do tipo da ferramenta para que haja conveniência com o uso adequado (WU et al., 2012).

Quando utilizadas apropriadamente, esse tipo de ferramenta pode fornecer meios de reduzir os custos e aumentar a produtividade. O aperfeiçoamento realizado em sua composição para melhoria das propriedades tem possibilitado seu uso em uma gama superior de materiais do que era indicado há alguns anos, e suas vantagens podem ser manifestadas na usinagem de formas geométricas complexas em apenas um passo e também na qualidade superficial em materiais endurecidos (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2006).

Ainda de acordo com Kumar, Durai e Sornakumar (2006), o entendimento dos mecanismos de desgaste é importante e se faz como requisito necessário para a utilização adequada das ferramentas cerâmicas. O desgaste pode ser classificado em duas categorias principais, sendo estas o desgaste mecanicamente ativado, o qual está associado com a integridade mecânica da ferramenta (abrasão, deformação plástica, fratura, entre outros) e o desgaste quimicamente ativado, também conhecido como desgaste triboquímico, o qual inclui desgaste por difusão ou dissolução. O efeito combinado desses mecanismos, ou a predominância de algum deles é dependente do material da ferramenta e da peça a ser trabalhada, e também das condições de corte.

A falha da ferramenta também é geralmente atribuída a excessivos desgastes na aresta de corte e na face de ataque, onde o contato entre a ferramenta é dado de forma significativa com a peça e o cavaco, respectivamente (CASTO et al., 1991).

Outro problema também enfrentado pela utilização das ferramentas cerâmicas, limitando mais ainda sua aplicação, é a baixa tenacidade, e a consequência da falta dessa propriedade gera quebras e lascamento com mais facilidade. Inserido no contexto de avarias e desgastes, o esperado e o ideal é que a cerâmica se desgaste mecanicamente ou quimicamente, visto que as avarias se desenvolvem rapidamente e inutiliza o inserto com eventual dano à peça (RIBEIRO; MALÈRE; RIBEIRO, 2007).

Devido a estudos realizados ao longo do tempo, é possível observar determinados efeitos de ferramentas cerâmicas utilizadas em diferentes materiais. Na usinagem do AISI 52100 endurecido (~63HRc) com insertos de cerâmica mista na matriz Al_2O_3 -TiCN com e sem revestimento de TiN, foi possível observar que o tipo de desgaste dominante em ambos os tipos de insertos foi o desgaste de cratera (ASLANTAS; UCUN; ÇICEK, 2011).

Observa-se que, em geral, insertos cerâmicos mistos de alumina revestidos com TiN possuem um melhor desempenho comparado com insertos cerâmicos mistos sem revestimento, em particular na rugosidade superficial da peça; todavia, o inserto sem revestimento apresenta-se mais útil na minimização das componentes da força de corte (BENSOUILAH et al., 2015).

O estudo realizado por Kumar, Durai e Sornakumar (2003) revelou que o desgaste abrasivo é o mecanismo predominante em ferramentas cerâmicas à base de alumina quando se trata da usinagem de aços endurecidos.

Dentre uma comparação de utilização de insertos cerâmicos com matriz Al_2O_3 +TiCN com e sem revestimento de TiN e ferramenta de Al_2O_3 com SiC (whisker) reforçado, foi verificado que o impacto negativo da velocidade de corte no desenvolvimento do desgaste é mais manifestado para o inserto sem revestimento; o melhor acabamento superficial é obtido no inserto sem revestimento em todas as velocidades de corte estudadas; com relação às forças de corte, elas foram menos evidenciadas do que para o inserto reforçado de whisker em todas as velocidades de corte estudadas, o que indica que a usinagem com as duas primeiras ferramentas é mais vantajosa do que com a última em termos de exigência de energia e força; além

disso, foi verificado também que as forças de corte geralmente elevam-se proporcionalmente ao desgaste do flanco (CAMUŞCU, 2005).

Os experimentos realizados, baseados no estudo da utilização do aço AISI 4140 (63HRC) torneado com ferramenta cerâmica mista de Al_2O_3+TiCN , mostraram que a velocidade de corte é o único fator estatisticamente significativo influenciando o desgaste da ferramenta, e também que ela é inversamente proporcional ao desgaste da ferramenta, ou seja, enquanto a velocidade aumenta, o desgaste diminui (ASLAN; CAMUŞCU; BIRGÖREN, 2006).

Com o estudo e análise do mecanismo de desgaste entre uma ferramenta cerâmica mista de alumina e $Ti[C,N]$ e outra com alumina e SiC (whisker) reforçada no torneamento do aço inoxidável martensítico 410 (60HRC) e do aço EN 24 (45RHC), pode ser observado que os desgastes de flanco, cratera e entalhe são maiores no aço inoxidável do que no aço endurecido, o que pode ser causado devido à alta dureza do primeiro. Também pode ser concluído que a ferramenta com $Ti[C,N]$ possui um desempenho mais satisfatório do que a qual possui whisker reforçado, para ambos os materiais estudados (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2005).

Em Ribeiro, Malère e Ribeiro (2007), num estudo envolvendo quatro insertos cerâmicos com composições do tipo Al_2O_3+TiC , SiAlON e Si_3N_4 provenientes de duas fabricantes distintas, foi concluído que o uso da cerâmica em ferros fundidos coquilhados é viável em ambas operações de acabamento e desbaste apresentando boa qualidade superficial, resultado este superior ao obtido com ferramenta de metal duro. Já em cilindros de aço, a cerâmica possui a capacidade de proporcionar vantagens no acabamento superficial, uma vez removidas superfícies irregulares e oxidadas, contrariamente à operação de desbaste, comparando-se com metal duro em função da taxa horária de remoção do material. Esse resultado possibilita a confirmação da assertiva que enuncia a adequação do uso de ferros fundidos e aços endurecidos como sendo materiais apropriados para o uso de ferramentas cerâmicas, devido à baixa energia de corte de ambos os materiais, gerando como consequência a tendência de formação de cavacos curtos durante processos de usinagem.

Como resultado de um estudo experimental sobre a relação entre as propriedades físicas e a vida útil das ferramentas cerâmicas em comparação com ferramentas à base de carboneto, utilizando um corpo de prova de aço carbono 0,4%, concluiu-se que o desempenho da ferramenta cerâmica é afetada por suas propriedades físicas, tais como peso específico, estrutura cristalina e resistência à

ruptura transversal; além disso, foi observado que, com relação ao tipo de falha, devido à fragilidade da cerâmica, rupturas repentinas e abruptas na aresta de corte (lascamento) tendem a ocorrer; em adição, é necessário escolher apropriadamente a geometria da ferramenta e a condição de corte para o aumento da vida útil, particularmente no que compete ao ângulo de ataque, sendo que ângulos negativos mostraram-se efetivos na melhoria da mesma da ferramenta (OKUSHIMA; FUJII, 1959).

Testes conduzidos com a utilização de insertos cerâmicos com geometrias convencional (standard) e wiper no torneamento do aço endurecido AISI D2 revelaram que, em geral, a wiper possui um desempenho melhor comparado com a standard, em particular na rugosidade superficial do corpo de prova; além disso, velocidade e tempo de corte se mostraram ser os principais parâmetros que afetam o desgaste do flanco, este evidenciado ser excessivo, tendo correspondência com a redução da rugosidade superficial; por fim, as pressões de corte, bem como a rugosidade superficial, são fortemente influenciadas pela taxa de alimentação (avanço) (DAVIM; FIGUEIRA, 2007).

Num estudo de investigação de acabamento de superfície e desgaste de flanco de ferramenta de corte de alumina mista revestida com TiN do tipo wiper no torneamento do aço endurecido AISI D2 foi observado que, em geral, taxas baixas de avanço proporcionam uma melhor vida útil, e a combinação de baixo avanço com alta velocidade de corte propiciaram um acabamento superficial satisfatório, e em adição, uma melhor vida da ferramenta foi obtida em menores avanços e maiores velocidades de corte, como esperado e também observado no acabamento (ÖZEL et al., 2007).

Num breve estudo sobre testes em ferramentas cerâmicas de corte em operações interrompidas, foi constatado e documentado que as ferramentas cerâmicas se mostram aceitáveis para procedimentos de corte interrompidos, e em adição, o desvio médio aritmético (rugosidade) do perfil é adequado (CEP; BARISIC, 2008).

No que compete ao estudo realizado envolvendo a aplicação de cerâmicas na usinagem, o tipo de falha mais presente no flanco da ferramenta cerâmica foi o do tipo retangular, e a falha do tipo cratera na cerâmica apresentou-se menor comparado com ferramentas à base de carboneto e TiC; a quebra da aresta de corte ocorreu com frequência em corte intermitente e na usinagem de alumínio, o que poderia ter sido evitada com a escolha apropriada de condições de corte; é possível dizer que a

resistência a elevadas temperaturas da ferramenta cerâmica está relacionada com o desempenho da mesma; a variação da vida útil da ferramenta se torna mais ampla com a diminuição da resistência à ruptura transversal, porém a máxima vida tende a aumentar com a diminuição da tenacidade, sendo essa superior em insertos cerâmicos que em ferramentas de carboneto a elevadas velocidades (OKUSHIMA; FUJII, 1963).

Na investigação experimental do efeito do avanço e velocidade de corte na rugosidade superficial no acabamento da liga Inconel 718 utilizando insertos cerâmicos triangulares à base de alumina foi encontrado que menor é o desgaste da ferramenta e melhor o acabamento superficial do material utilizando baixas velocidades de corte, o que foi concluído através do estudo. Ainda com a utilização de insertos cerâmicos, baixos valores de rugosidade superficial foram alcançados, e o desgaste do flanco e de entalhe foram dominantes em condições de velocidades mais elevadas (ARUNA; DHANALAKSHMI; MOHAN, 2010).

Com relação às características de desgaste das ferramentas cerâmicas, um estudo obteve alguns resultados quanto a isso: cerâmicas com uma maior tenacidade podem ser utilizadas eficazmente a baixas e elevadas velocidades; a baixas velocidades de corte, as ferramentas cerâmicas se desgastam majoritariamente por deformação plástica; em processos com velocidade mais elevada, foi revelado que o desgaste por deslizamento é acelerado por trincas locais em adição à deformação plástica, além de que se pode observar desgaste por difusão (entre alumina e FeO), o qual é um processo mais vagaroso comparado aos outros mecanismos; cerâmicas podem oferecer melhores resistências a desgaste por oxidação, entalhes e ranhuras do que outras ferramentas; através dos mecanismos observados de desgaste, é notável que a resistência ao desgaste de cratera de uma ferramenta cerâmica é melhor que a observada em ferramentas à base de carbonetos, e pelos registros do crescimento do desgaste do flanco, é possível inferir que ferramentas cerâmicas tem mostrado elevada resistência ao desgaste, particularmente em altas velocidades (CHATTOPADHYAY; CHATTOPADHYAY, 1984).

Com relação ao processo de torneamento duro, um estudo foi realizado com a utilização de aço baixa liga de cromo temperado a 60 ± 1 HRC e insertos de alumina mista, e concluiu-se que em processo de acabamento, o desgaste da face do flanco ficou majoritariamente concentrada na ponta da ferramenta e na aresta

secundária ativa de corte, e em geral, os mecanismos envolvidos de desgaste abrangeram abrasão, fratura, deformação plástica, adesão, transferência de material e também efeitos triboquímicos dependendo das condições mecânicas e térmicas geradas nos testes (GRZESIK, 2008).

Em um conjunto de testes realizados em AISI 1040 com diversas ferramentas cerâmicas, inclusive insertos de cerâmica mista à base de alumina a baixa velocidade de corte, vale ressaltar que para o uso desses insertos, apesar da deformação plástica, o desgaste químico também desempenha um papel importante na zona do desgaste de cratera (CASTO et al., 1997).

2.3 AÇO LIGA AISI 8640

O aço utilizado para o estudo vigente é caracterizado como sendo um aço médio carbono e baixa liga largamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos.

O aço AISI 8640 caracteriza-se por ser um aço para beneficiamento com médio teor de carbono (até 0,43% de C) e baixa liga (geralmente a soma dos elementos presentes chega até 5%), com temperabilidade média, também conhecido por ser um aço ARBL, alta resistência e baixa liga. O aço liga leve foi desenvolvido em meados da década de 40, pela substituição de quase da metade da composição de cromo do aço 4630 por níquel, devido à escassez do elemento durante a Segunda Guerra Mundial. Com isso, foi-se observado que a combinação de Ni e Cr resultou em um produto com grande resistência mecânica e ao desgaste (MECÂNICA INDUSTRIAL, [201?]).

Os metais de liga primária são cromo, níquel e molibdênio, e os efeitos da interação desses elementos favorece o aperfeiçoamento das propriedades do material. O cromo eleva a resistência ao desgaste e a temperabilidade pela formação de carbonetos e por tornar mais fina a granulação do aço; o níquel, por sua vez, melhora a penetração da têmpera devido à diminuição da velocidade crítica de resfriamento e também contribui na diminuição da granulação do aço; já o molibdênio forma partículas resistentes à abrasão e evita a fragilidade do revenimento, e influencia favoravelmente a dureza, a resistência a quente e a fluência (QUALINOX, [201?]).

As propriedades mecânicas evidenciadas por sua composição química, observada na Tab. 1, conferem ao material elevada resistência à fratura, boa usinabilidade, elevada tenacidade, boa forjabilidade e baixa soldabilidade. Comparado com outros aços da mesma categoria, o AISI 8640 apresenta as melhores características mecânicas. Além disso, sua dureza superficial pode variar entre 52 e 57 HRc, e com a realização de tratamento térmico adequado, suas propriedades podem ser melhoradas. Suas características intrínsecas podem ser justificadas devido aos processos de fabricação controlados, garantindo, desta forma, o tamanho de grão austenítico, níveis de gases dissolvidos, pureza, entre outros (DEVERAS, 2017).

O aprimoramento citado anteriormente de suas propriedades pode ser realizado através do tratamento térmico denominado nitretação, o qual constitui-se como sendo um tratamento termoquímico que promove o endurecimento superficial da peça através da difusão do nitrogênio, que reage com os elementos contidos na composição química e forma nitretos de elevada dureza e resistência ao desgaste, com a finalidade de melhorar a resistência à fadiga, à corrosão, ao desgaste e à escoriação pela promoção da elevação da dureza superficial (CHIAVERINI, 2009).

Tabela 1 – Composição química do aço liga AISI 8640

ABNT/SAE	Elementos presentes (%)							
	C	Mn	P máx	S máx	Si	Ni	Cr	Mo
8640	0,38	0,75	0,030	0,040	0,15	0,40	0,40	0,15
	0,43	1,00			0,35	0,70	0,60	0,25

Fonte: Adaptado de Favorit Aços Especiais.

O aço AISI 8640 apresenta características mecânicas e metalúrgicas não apresentadas pelos aços de baixa liga devido ao controle de seu processo de fabricação, e as faixas de composição química são orientadas por diversas normas, o que não garante teores da liga dentro de limites específicos (RUFFATO, [2013?])

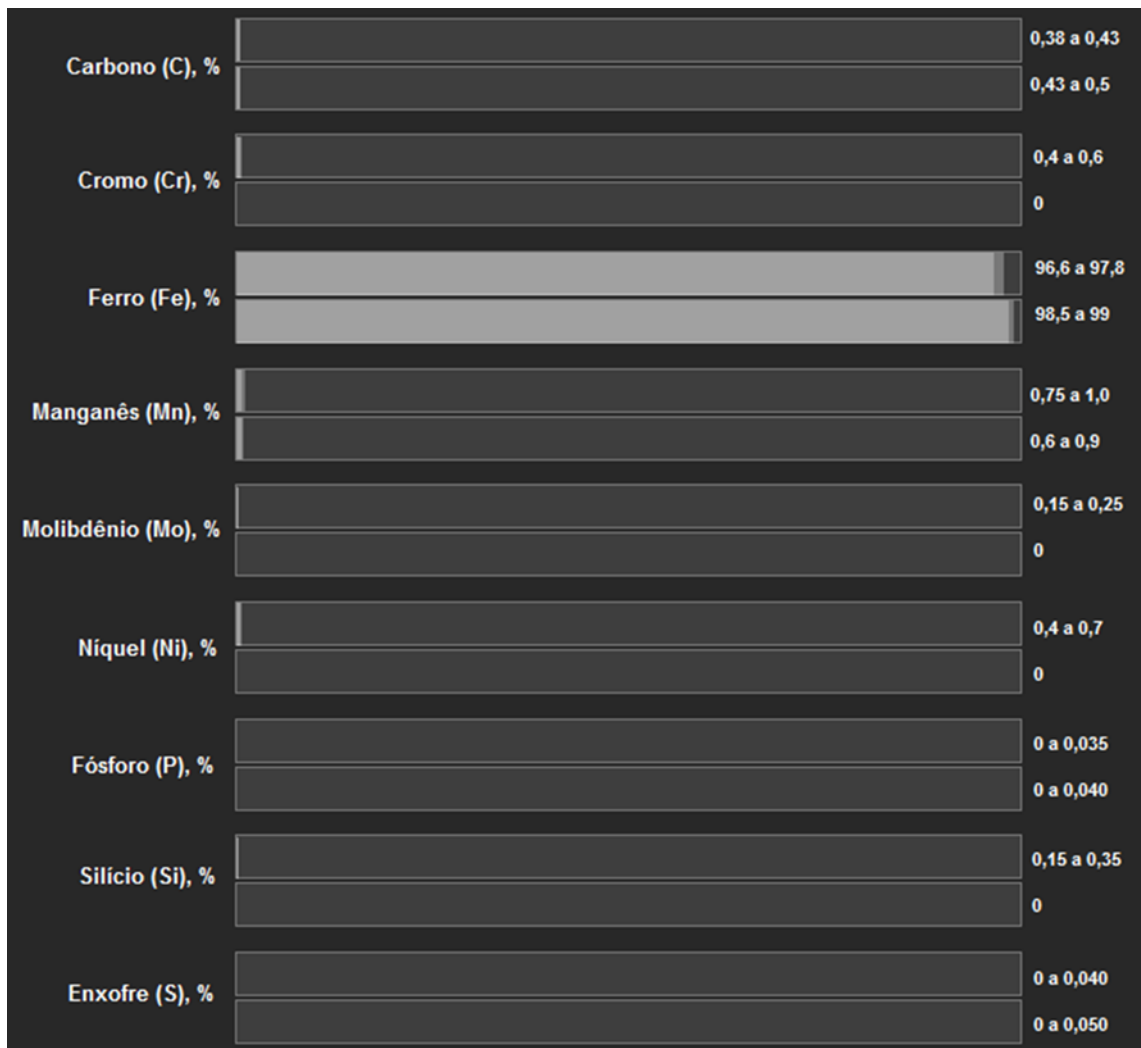
Atualmente, as indústrias metalmeccânicas exigem requisitos fundamentais quando se trata de precisão dimensional e qualidade superficial final dos produtos, e a usinagem do aço 8640 permite que esses resultados sejam alcançados. Como exemplo, peças como eixos, pinos, rolamentos e virabrequins das indústrias automobilística e agrícola são obtidas através desse processo, o material estando na condição de laminado a quente ou termicamente tratado (SANTOS et al., 2014).

A utilização do aço AISI 8640 abrange componentes para sistemas mecânicos de uso geral onde o emprego do SAE 1045 não é aplicável, justamente pela sua melhor capacidade de endurecimento em seções transversais, resistência à fadiga e à fratura. Além disso, pode ser utilizado também em aplicações similares ao aço 4140, levando em consideração sua temperabilidade inferior ao aço da classificação 4XXX. Como exemplos, pode-se citar seu uso em engrenagens, eixos, parafusos, ferramentas manuais, englobando indústrias agrícola, automobilística, de máquinas e equipamentos.

No que concerne à escolha de material para propósitos mais abrangentes, é de interesse comum que o material possa suportar os esforços a que são submetidos em suas aplicações específicas. Com a adição de elementos de liga, é possível melhorar as propriedades mecânicas apresentadas pelo material, como foi discutido previamente, justificando o benefício de seu uso. Estabelecendo um paralelo com o aço da classe 10XX (aço carbono) de igual concentração de carbono, tem-se a analogia entre o aço AISI 8640 e o aço SAE 1045.

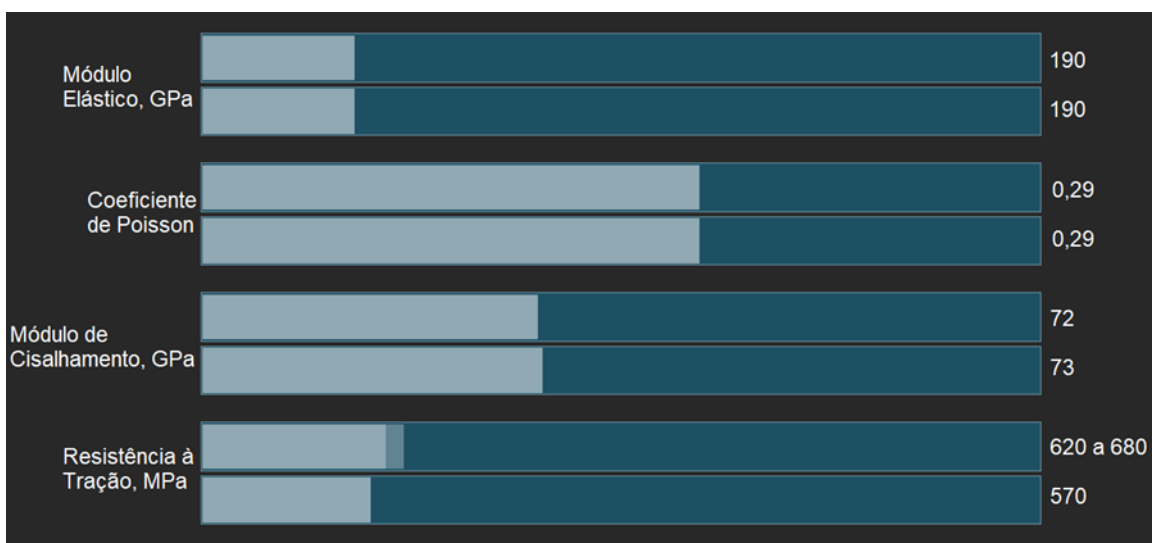
Ambos os aços são ligas à base de ferro, e possuem uma composição química média altamente similar, podendo chegar a 98% de semelhança (MakeltFrom, [201?]). Na Fig. 5 é possível observar a comparação dos elementos presentes em cada liga, sendo que a barra superior representa o aço AISI 8640 e a inferior, o aço SAE 1045, e na Fig. 6 observa-se a comparação numérica entre propriedades mecânicas dos mesmos.

Figura 5 – Composição química das ligas AISI 8640 e SAE 1045



Fonte: Adaptado de MakeltFrom.com.

Figura 6 – Propriedades mecânicas dos aços AISI 8640 e SAE 1045



Fonte: Adaptado de MakeltFrom.com.

Pela análise da composição química acima, é possível notar a ligeira diferença de ferro (Fe) nas composições, indicando menor concentração no aço AISI 8640 devido à adição dos elementos de liga os quais não predominam no aço SAE 1045. Cromo (Cr), níquel (Ni) e molibdênio (Mo), presentes no aço baixa liga, concedem ao material propriedades mecânicas previamente citadas, essas sendo superiores ao do aço carbono, que apresenta propriedades mecânicas medianas e temperabilidade baixa, ou seja, baixa penetração de dureza na seção transversal, não sendo recomendado seu uso para seções superiores a 60mm. Além disso, a presença de silício (Si) no aço baixa liga fornece certa resistência à oxidação em temperaturas elevadas e é um desoxidante geral, favorecendo progressivamente seu uso.

O aço 8640 possui vasta aplicação na construção mecânica, e substitui o aço 1045 devido a sua melhor propriedade nas seções transversais e resistência à fadiga. Ele é considerado um aço alta resistência e baixa liga (ARBL), e pode-se aplicar tratamentos térmicos diversos a fim de se obter propriedades desejáveis (FREITAS; VASCONCELOS; MACEDO NETO, 2016).

Com isso, é evidente o benefício do emprego do aço AISI 8640 em substituição ao aço SAE 1045, pois as vantagens relacionadas à melhoria das propriedades mecânicas justificam seu custo, podendo ser utilizado em extensos projetos e finalidades.

A avaliação do aço é dada através de extensos experimentos realizados no campo da usinagem, e através de alguns resultados obtidos, é possível enriquecer o conhecimento técnico já existente. Num estudo liderado por Richetti et al. (2004), estudando a usinagem (fresamento) do AISI 8640 utilizando insertos revestidos com carboneto (designação ISO SEMN 12 04 AZ das classes P45 e M35), foi encontrado que as curvas do desgaste do flanco de zero até 0,2 mm apresentaram uma região de crescimento uniforme e estável na maioria dos testes realizados. Na região do desgaste do flanco, as forças de corte e as temperaturas causadas pelo atrito entre a superfície de folga e o corpo de prova não apresentaram influência significativa no processo de desgaste da ferramenta, tendo como consequência o desgaste reduzido no estágio inicial da operação. Além disso, os valores de desgaste superiores a 0,2 mm aumentaram a força de corte, temperatura e as taxas de desgaste, tendo em vista que a fratura da aresta de corte acelerou o desgaste em alguns casos, o que pode estar associado às fissuras por fadiga (fenômeno térmico), promovidas pela variação cíclica da temperatura da ferramenta. É concluído também que a vida útil da

ferramenta e o volume de material removido são inversamente proporcionais quando utilizados um maior número de insertos na fresa, ou seja, a remoção aumenta e a vida útil diminui. Por fim, aumentando a taxa de alimentação (avanço), aumenta-se o desgaste.

Em outro estudo conduzido por Santos et al. (2014), a partir de resultados de fresamento do aço AISI 8640 utilizando insertos de metal duro, conclui-se brevemente que os esforços de corte foram influenciados pela velocidade de corte, visto que o aumento da velocidade diminui o esforço, sendo esta caracterizada pelas componentes da força de avanço, força de corte e momento torsor, e a variação da taxa de alimentação por dente (avanço) igualmente influenciou os esforços, observado que quanto maior o avanço, menor os esforços.

Utilizando insertos de metal duro no formato standard e wiper no torneamento do aço AISI 8640, foi verificado que a rugosidade superficial foi negativamente influenciada com o aumento da profundidade de corte e da taxa de alimentação, sendo que, para a ferramenta standard, este aumento foi mais significativo. Através da literatura e dos ensaios realizados, foi corroborada a assertiva que a ferramenta wiper apresenta valores mais satisfatórios de rugosidade superficial, chegando a ser até 150% menor do que a encontrada realizada pela ferramenta standard, além de poder trabalhar em uma maior faixa de parâmetros de entrada (DEVERAS, 2017).

Já na utilização de insertos triplamente revestidos (TiN-TiC-TiN) na usinagem (fresamento) do aço AISI 8640, foi observado que o uso de fluidos refrigerantes reduziu a temperatura média entre cavaco-ferramenta, embora o gradiente térmico tenha sido diminuído quando usinado a altas velocidades de corte. O consumo de energia aumentou com prolongamento da operação devido ao aumento do desgaste da ferramenta. Com relação à vida útil da ferramenta, ela caiu de acordo com o uso de velocidades maiores, independentemente das condições de refrigeração/lubrificação impostas, e a maior vida útil encontrada foi alcançada na operação com ausência de fluido de corte. Por fim, os valores das rugosidades superficiais mostraram-se aleatórias de acordo com o tempo de corte, e cabe ressaltar que a melhor qualidade superficial encontrada foi obtida sob condições de usinagem a seco (VIEIRA; MACHADO; EZUGWU, 2001).

Em Machado, Motta e da Silva (1997), o estudo conduzido utilizando aço AISI 8640 e ferramentas de carboneto cementadas com revestimento triplo de TiC,

Al_2O_3 e TiN (designação ISO INMG 220408-QM) exibiu que, com uma análise SEM (Scanning Electron Microscopy), foi mostrado que o principal mecanismo de desgaste encontrado foi dissolução-difusão a baixas condições de corte, e a deformação plástica foi o processo de desgaste mecânico dominante.

No beneficiamento do aço 8640 utilizando tratamentos térmicos, pode ser observado que o aço apresentou um comportamento agradável quanto a aplicação de tratamentos térmicos, sendo eles recozimento, normalização, têmpera e revenido, o que infere que sua utilização tanto no estado padrão quanto beneficiado é cabível (FREITAS; VASCONCELOS; MACEDO NETO, 2016).

3 METODOLOGIA

Com o intuito de se alcançar os objetivos previamente propostos neste trabalho, os quais englobam a análise e verificação de condições de usinagem do inserto de cerâmica mista no torneamento do aço baixa liga AISI 8640, este estudo foi conduzido com o auxílio de uma metodologia apropriada para execução de atividades através de um planejamento prévio e adequado. Com o auxílio da literatura e da revisão teórica realizada, além da orientação do docente responsável e do uso do laboratório e equipamentos disponíveis para utilização, realizou-se a investigação proposta.

Foi disponibilizado para este estudo três tarugos do aço baixa liga AISI 8640 não tratado termicamente, com as dimensões de $\varnothing 75,9 \times 220,2$ mm, aproximadamente, todavia foi necessário utilizar apenas uma unidade devido à dimensão, e quatro insertos triangulares de cerâmica mista da marca Widia, com denominação ISO TNGA160408T02020 e número ANSI TNGA332T0820. Ela possui classificação CW2015 com numeração 2952541, qualificando-a como sendo um inserto sem revestimento, para arestas de corte estacionárias (torneamento, sangramento, rosqueamento). Sua composição química dá-se por $Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC + TiCN$, sendo sua matriz composta por alumina e carbonitreto de titânio. Como características, possui boas propriedades de tenacidade combinada com boa resistência ao desgaste. É utilizada para semi-acabamentos e acabamentos em geral, e sua utilização engloba materiais endurecidos à base de ferro e acabamentos em ferro fundido cinzento. Pela Fig. 7, é possível observar o nível de tenacidade da ferramenta de corte, o que mostra que ela possui elevada resistência ao desgaste para ambos os materiais indicados, evidenciando baixa capacidade de absorção de energia mecânica (plástica ou elástica), sendo assim, um material frágil e pouco tenaz. O índice 05 expressa a finalidade para acabamentos finos, 10 expressa a finalidade para acabamentos em geral e o 15, acabamentos mais grosseiros tendendo ao desbaste de material.

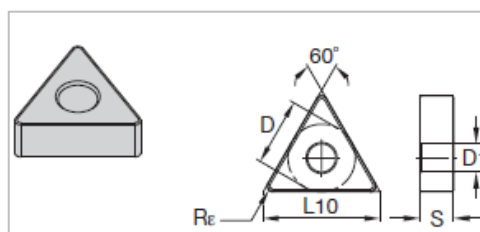
Figura 7 – Nível de tenacidade do inserto cerâmico CW2015

	Resistência ao desgaste ← → Tenacidade									
	05	10	15	20	25	30	35	40	45	
K										
H										

Fonte: Adaptado de Widia Master Catalog 2017, p. B173.

Com relação às suas dimensões, possui aresta de corte $L10 = 16,50\text{mm}$, raio da ponta $R\epsilon = 0,8\text{mm}$, espessura $S = 4,75\text{mm}$ e diâmetro interno do furo $D1 = 3,81\text{mm}$, com ângulo entre arestas $\alpha = 60^\circ$, dimensões estas podendo ser observadas na Fig. 8. (WIDIA, 2017). Não apresenta quebra-cavaco em sua geometria e o ângulo para uso é negativo.

Figura 8 – Ilustração do inserto cerâmico



Fonte: Widia Master Catalog 2017, p. B194.

Para cada material especificado para uso da ferramenta em questão, há uma intervalo ideal onde se pode trabalhar com os parâmetros de corte, estes sendo, primariamente, profundidade de corte (ap), avanço (f) e rotação (n), que, aplicadas em equações matemáticas específicas, fornecem informações significativas para o entendimento do processo, como velocidade de corte (vc), velocidade de avanço (vf), taxa de remoção de material (TRM), entre outros. Para efeito elucidativo, seguem as breves definições dos parâmetros supracitados (SILVEIRA, [201?]):

- Profundidade de corte: grandeza que indica a camada de material a ser removida no passe, dada em mm;
- Avanço: também conhecido por taxa de alimentação, caracteriza-se como sendo o espaço percorrido sobre a peça pela ferramenta em

cada revolução dada pela máquina, segundo a direção e sentido de avanço, dado em mm/rev;

- Rotação: número de revoluções que ocorrem dentro de um determinado período, dada em rpm;
- Velocidade de corte: caracteriza-se por ser a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, conforme a direção e o sentido de corte, dada em m/min;
- Velocidade de avanço: velocidade instantânea da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço, dada em mm/min;
- Taxa de remoção de material (TRM): volume de material usinado por unidade de tempo, dada em mm³/min;

Para o inserto em questão, os intervalos para os parâmetros de avanço, profundidade e velocidade de corte são apresentados na Fig. 9, de acordo com os materiais a que é indicado.

Figura 9 – Parâmetros para inserto cerâmico

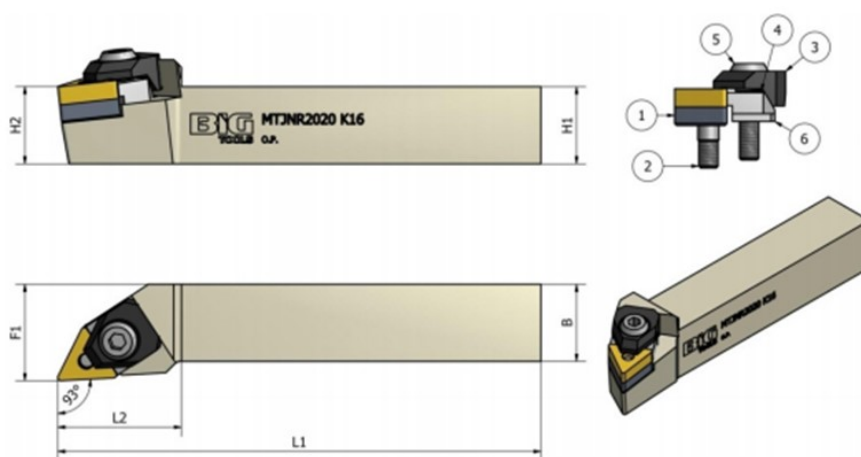
Classificação do material		Velocidade de Corte - vc m/min								
		CW2015			CW3020			CW5025		
		min	Ideal	max	min	Ideal	max	min	Ideal	max
ap [mm]		0,5		4,0	0,5		4,0	1,0		8,0
f [mm/rev]		0,2		0,4	0,1		5,0	0,2		0,6
P	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	1	250	475	725	-	-	-	250	760	1000
	2	300	550	800	-	-	-	275	365	490
	3	250	400	600	-	-	-	275	335	440
N	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	1	-	-	-	170	200	375	-	-	-
	2	-	-	-	170	200	375	-	-	-
	3	-	-	-	190	250	375	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	1	60	100	140	45	85	125	-	-	-
	2	60	100	140	45	85	125	-	-	-
	3	60	100	140	45	85	125	-	-	-
	4	60	100	140	45	85	125	-	-	-

Fonte: Adaptado de Widia Master Catalog, p. B175

De acordo com o quadro acima, é possível notar que a classificação de materiais é dividida em subgrupos, que para o ferro fundido (K) abrange as classes de 1 a 3, e para os aços endurecidos (H), abrange as classes de 1 a 4. O subgrupo K1 é representado pelo ferro fundido cinzento; o K2, pelos ferros fundidos dúcteis, maleáveis e com grafita compactada; já o K3 é representado pelos ferros fundidos austemperados. Para o grupo dos aços endurecidos, o subgrupo H1 é representado pelos aços extra duros, com nível de dureza que alcança até 63HRc; H2, H3 e H4 são representados pelos ferros fundidos coquilhados, com níveis de dureza de até 55HRc, 40HRc e 67HRc, respectivamente (WIDIA, 2017).

Com relação ao suporte utilizado, ele pertence à marca Big Tools e atende pelo código MTJNR2020K16. Pela sua identificação, pode-se obter informações como o tipo de fixação (letra M – cunha e grampo), formato do inserto (letra T – triangular), ângulo de posição (letra J – 93°), ângulo de folga (Letra N – negativo), sentido de corte (letra R – direito), altura e largura da haste (numeração 2020 – □20mm), comprimento da ferramenta (letra K – 125mm) e comprimento da aresta de corte (numeração 16 – círculo inscrito de 9,525mm). Na Fig. 10 é possível observar sua especificação dimensional, de acordo com referência do inserto.

Figura 10 – Especificações dimensionais para suporte MTJN – 93°



Fonte: Adaptado de Catálogo Big Tools, p. 7.

Como partes integrantes da metodologia elaborada, seguem abaixo as etapas que foram concluídas.

3.1 UNIFORMIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO CORPO DE PROVA

O início dos experimentos do presente trabalho foi marcado pelo procedimento de uniformização da superfície do corpo de prova, o qual se encontrava com diversos canais ao longo de sua área efetiva de usinagem, além de diversos pontos de oxidação, provenientes da falta de lubrificação adequada e armazenamento em ambiente desapropriado, podendo ser observado na Fig. 11.

Figura 11 – Superfície original do corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2018.

Para o desbaste da superfície, foi utilizado um dos tornos disponíveis no Laboratório de Usinagem, H006 – Bloco H da UTFPR/PB, torno este sendo da marca Romi, modelo Tormax 20. Cabe ressaltar que o anel graduado que permite o movimento transversal da ferramenta com relação à peça, com escala de 0,05mm,

retira do diâmetro do corpo de prova o mesmo valor atribuído ao anel, ou seja, avançando um valor específico, o carro transversal penetrará metade deste valor, para que, ao final do processo, o diâmetro esteja com uma medida igual à subtração do avanço transversal do diâmetro inicial. O inserto utilizado foi do tipo metal duro, disponibilizado pelo Laboratório de Usinagem. A parte oxidada e os canais existentes foram completamente removidos, deixando a superfície uniforme e possibilitando a existência de uma área de referência para os testes posteriores (Fig. 12).

Figura 12 – Superfície de referência



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os parâmetros de corte utilizados para realizar a operação de torneamento foram rotação da máquina $n=1000\text{rpm}$ e avanço de corte $f=0,042\text{mm/rev}$, oscilando os valores de profundidade de corte de acordo com a necessidade de desbaste ou acabamento da peça, variando entre 0,2 e 0,5mm.

3.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS NO CORPO DE PROVA

Previamente à realização dos procedimentos de usinagem no corpo de prova para obter os resultados experimentais, foram realizados dois ensaios mecânicos no mesmo: dureza e rugosidade superficial. Estes ensaios apresentam

importância significativa para o estudo vigente pois tais parâmetros ajudam a entender a associação entre a superfície a ser usinada e a ferramenta de corte.

Para a dureza, foi necessário retirar uma amostra menor do tarugo original para realizar as indentações na face, pois seu comprimento total e sua massa impediam o equilíbrio do corpo de prova na base do equipamento de dureza. Sendo assim, primeiramente, foi efetuada a abertura de um canal na peça, demarcando o local para posterior corte e deixando o disco final com uma espessura de aproximadamente 22mm. O corte foi realizado no torno previamente citado, com o auxílio de um bedame para sangria disponibilizado pelo Laboratório de Usinagem. Na Fig. 13 é possível observar o início da operação de sangramento do corpo de prova.

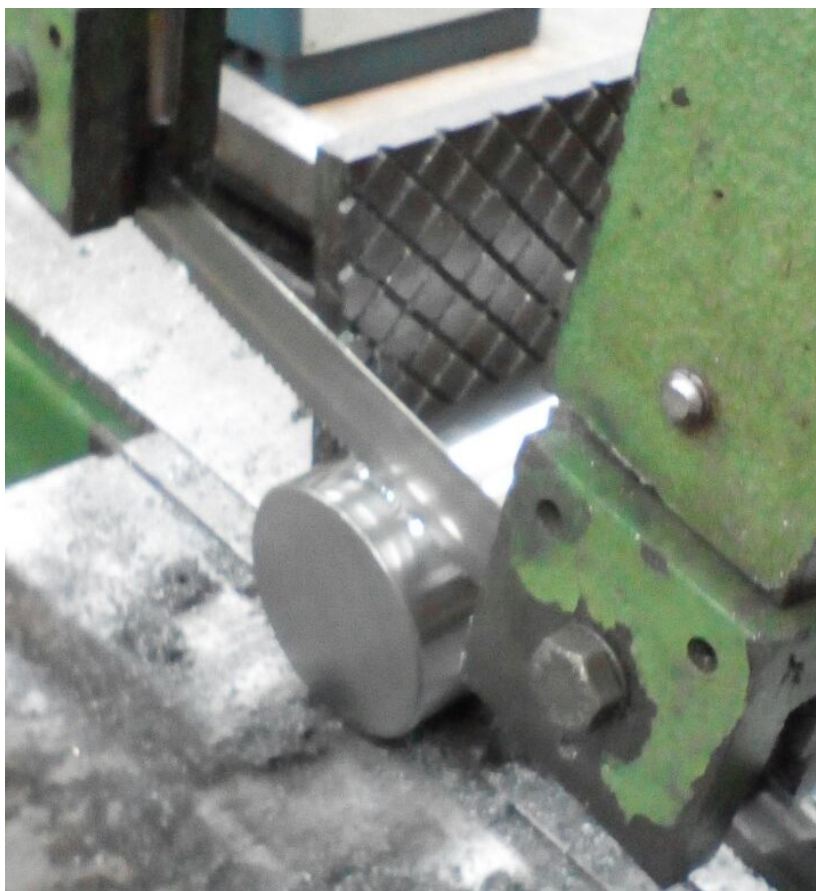
Figura 13 – Início do processo de sangramento



Fonte: Autoria própria, 2018.

Após a abertura do canal para auxiliar no corte do disco de prova, a peça foi levada à serra de fita automática presente no Laboratório de Usinagem para executar a segmentação final do disco, podendo ser observada sua representação na Fig. 14.

Figura 14 – Representação do corte final do disco de prova



Fonte: Autoria própria, 2018.

Por fim, para garantir o paralelismo de suas faces e uma superfície adequada para o cumprimento dos testes de dureza, foi efetuado seu faceamento, e sua espessura final chegou à dimensão de 20mm (Fig. 15).

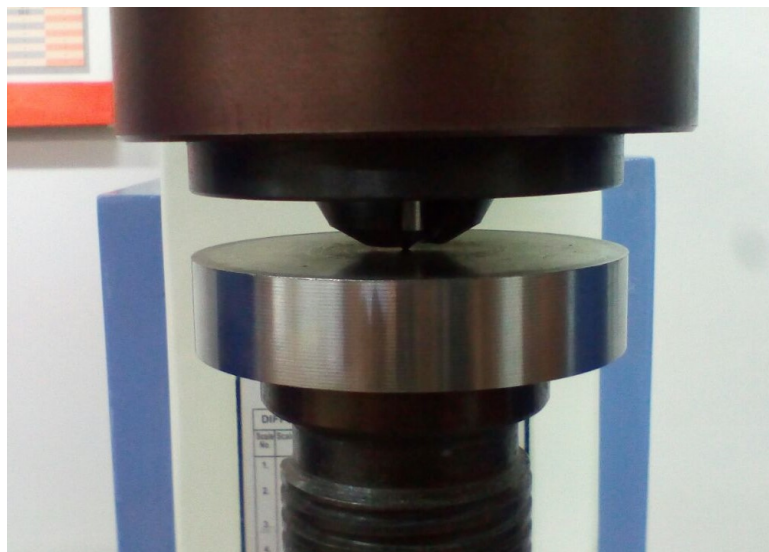
Figura 15 – Faceamento do disco de prova



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com o disco de prova usinado, foi possível realizar o teste de dureza, este sendo realizado por intermédio do durômetro da marca Digimess, modelo MSM (B) e número de série 2008/003, disponibilizado pelo laboratório de Ensaio dos Materiais, H005 – Bloco H da UTFPR/PB, na escala de dureza Rockwell C, sobre a face plana pós-usinada, podendo ser observado na Fig. 16.

Figura 16 – Medição de dureza no disco de prova



Fonte: Autoria própria, 2018.

Para obtenção de uma melhor média de dureza, foram realizadas 4 indentações, onde três delas foram dispostas a cerca de 120° entre si a uma distância de aproximadamente 15mm da periferia, e a quarta indentação foi realizada no centro do disco (Fig. 17). A carga de teste foi de 150kg e o indentador utilizado foi de diamante.

Figura 17 – Identificação das indentações na face do disco de prova



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os resultados obtidos foram registrados, e se encontram na tabela abaixo:

Tabela 2 – Dureza do disco de prova

Θ [°]	HRc
0	32,0
120	35,5
240	35,0
Centro	25,5

Fonte: Autoria própria, 2018.

Analisando o resultado da tabela acima, é possível observar que o núcleo do corpo de prova se encontra com uma dureza diferente e menor do que a da periferia, indicando que a profundidade de endurecimento e a distribuição da dureza ao longo da seção não se deu de maneira uniforme, podendo ser justificadas pela

solidificação do material em seu processo de produção, visto que não foi realizado nenhum tipo de tratamento térmico na peça, e o encruamento que possivelmente pode ter ocorrido ao se usinar o material, ou seja, aumento da dureza devido à deformação plástica, o qual ocorre a frio, não afetou o material em sua camada mais interna devido ao diâmetro do corpo de prova ser elevado.

Com relação à rugosidade superficial, esta foi realizada por intermédio do rugosímetro TR 220 Roughness Tester da TIME Group Inc., também disponibilizado pelo Laboratório de Usinagem, com range de $\pm 80\mu\text{m}$, aferido previamente à sua utilização com bloco padrão. As medições foram realizadas no sentido longitudinal da barra (Fig. 18), e no total foram feitas três medições, cada uma delas medida a 120° de distância entre si, levando em consideração a norma EN ISO 4288:1997, que define parâmetros como:

- Caso o comprimento de avaliação não for igual a 5 amostras, a maior e menor medida devem ser recalculadas e associadas a um comprimento igual a 5 amostras, definidas como padrão para proporcionar maior precisão no valor médio obtido; devido a isso, o comprimento de amostragem adotado foi de 0,8mm num total de 5 amostras;
- As medições devem ser realizadas em partes onde valores críticos de rugosidade são esperados; devido a isso, a direção de medição escolhida foi a longitudinal com relação à peça, ou seja, perpendicular à superfície da peça, onde a direção da seção pode corresponder a altos valores de rugosidade.

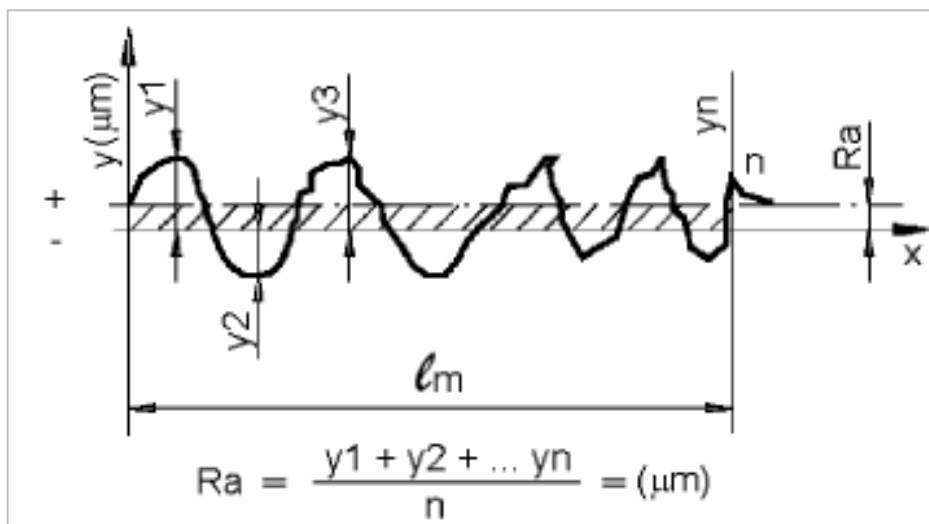
Figura 18 – Medição da rugosidade superficial média do corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2018.

Foram obtidos valores de rugosidade média (Ra), a qual consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento Y_i dos pontos de perfil em relação à linha média, dentro do comprimento total de avaliação (comprimento de amostragem). Na Fig. 19 é possível observar a representação da definição da rugosidade média.

Figura 19 – Representação da rugosidade média



Fonte: Bortolin, E.; Freddi, E. R.; Santacatarina, M. A, [201?].

Os resultados obtidos foram registrados, e se encontram na tabela abaixo:

Tabela 3 – Rugosidade média no corpo de prova

Θ [°]	Ra [μm]
0	1,222
120	1,217
240	1,205

Fonte: Aatoria própria, 2018.

3.3 REALIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE USINAGEM

Após a realização dos testes iniciais para começar a investigação proposta, foram realizados os testes de torneamento com os insertos cerâmicos disponibilizados para o estudo, objetivo do presente trabalho.

Para uma melhor administração dos testes, foram elaboradas tabelas onde podia-se controlar as grandezas de corte utilizadas, havendo intercalações sobre os parâmetros, para que a abrangência dos resultados fosse maior. Na Tab. 4 é possível observar o modelo da tabela elaborada.

Tabela 4 – Tabela de controle de parâmetros de corte

#	ϕ_i [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μm]			v_c [m/min]	v_f [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			

Fonte: Aatoria própria, 2018.

Na tabela acima, as grandezas referentes à rotação, à profundidade de corte e ao avanço foram previamente determinadas, definidas dentro de uma faixa de valores e havendo alternâncias entre si, para que as grandezas dependentes dessas variáveis pudessem ser posteriormente calculadas.

De acordo com Machado et al. (2010), o cálculo para a velocidade de corte é dado por:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

onde d representa o diâmetro da peça ou da ferramenta, em mm, e n representa a rotação, dada em rpm. Já a velocidade de avanço pode ser calculada através da seguinte equação matemática:

$$v_f = f \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

onde f representa o avanço, em mm/rev. A taxa de remoção de material (TRM), por sua vez, pode ser calculada através de:

$$TRM = v_c \cdot f \cdot ap \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (3)$$

A compreensão do efeito da taxa de remoção de material possui uma significância relevante para o estudo da integridade superficial, pois ela está intimamente ligada com a rugosidade da superfície, além de custos de operação, pois ela mede a produtividade em termos de quantidade de material removido pela máquina-ferramenta num período específico, em outras palavras, o volume específico de material removido. Na usinagem dos materiais, há uma busca constante por maiores taxas de remoção de material atrelada a um elevado grau de automatização. Para isso, exige-se um processo de usinagem confiável, onde é de suma importância a precisão da peça, a vida da ferramenta e a previsibilidade do acabamento superficial (RIGATTI, 2010).

A alteração da TRM pode ser feita através da alternância da velocidade de corte ou do avanço. Para aumentar a TRM pelo aumento da velocidade de corte, a rugosidade média aritmética Ra diminui, melhorando a qualidade superficial da peça; por outro lado, aumentando a TRM pelo aumento do avanço, o valor de Ra aumenta, diminuindo, desta forma, a qualidade superficial da mesma. Isto acontece pois o avanço está intimamente ligado à rotação, portanto aumentando o número de revoluções, o avanço aumenta, diminuindo o tempo de contato entre ferramenta e peça, contribuindo para o agravamento da integridade superficial.

Com relação às estratégias de usinagem, pode-se verificar nas tabelas subsequentes a metodologia utilizada para realizar os experimentos. Para os primeiros três testes efetuados, foi utilizado um inserto diferente para cada um, com o

intuito de atender o objetivo de efetuação da comparação entre dos resultados. Entre o cumprimento dos primeiros três testes e os três testes posteriores, e ao fim dos experimentos, foram efetuadas fotografias microscópicas, onde a descrição do procedimento de micrografia e eventual discussão foram realizadas no item seguinte do presente trabalho. Além disso, a rugosidade superficial do corpo de prova foi retirada cada vez que era dado um passe no torno, utilizando o mesmo instrumento de medição (rugosímetro) citado anteriormente, para que assim pudesse agregar informações para posterior análise e comparação. O comprimento linear efetivo de corte foi de 85mm, não podendo ter seu valor aumentado devido a limitações do equipamento, pois em comprimentos maiores, havia a possibilidade do castelo, que se encontra no carro longitudinal, colidir com a castanha em movimento, podendo causar acidentes.

Na Tab. 5 é possível observar os parâmetros adotados para realizar a primeira bateria de testes, onde o castelo do equipamento, onde é colocado o suporte com a ferramenta, foi orientado a 0° , permitindo somente a angulação fixada no suporte, sendo esta de 93° com relação à direção e sentido de corte.

Tabela 5 – Parâmetros de usinagem para a primeira série de testes

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]
1		1000	0,057	0,25
2		1000	0,057	0,50
3		1000	0,057	1,00
4		1000	0,104	0,25
5		1000	0,104	0,50
6		1000	0,104	1,00
7		1000	0,166	0,25
8		1000	0,166	0,50
9		1000	0,166	1,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tab. 6 é possível observar as grandezas associadas à segunda série de testes, com o mesmo posicionamento ferramental utilizado anteriormente.

Tabela 6 – Parâmetros de usinagem para a segunda série de testes

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]
1		1600	0,057	0,25
2		1600	0,057	0,50
3		1600	0,057	1,00
4		1600	0,104	0,25
5		1600	0,104	0,50
6		1600	0,104	1,00
7		1600	0,166	0,25
8		1600	0,166	0,50
9		1600	0,166	1,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tab. 7 se observa os parâmetros definidos e utilizados para o terceiro ciclo de testes, sendo utilizado o mesmo posicionamento ferramental descrito previamente.

Tabela 7 – Parâmetros de usinagem para a terceira série de testes

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]
1		2500	0,057	0,25
2		2500	0,057	0,50
3		2500	0,057	1,00
4		2500	0,104	0,25
5		2500	0,104	0,50
6		2500	0,104	1,00
7		2500	0,166	0,25
8		2500	0,166	0,50
9		2500	0,166	1,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tab. 8 observa-se os parâmetros utilizados para a quarta bateria de experimentos, a qual sinalizou o início do segundo ciclo de testes, sendo utilizado o mesmo inserto do teste indicado pela Tab. 5, sendo utilizada a mesma rotação e alternância de profundidade de corte, com a alteração da faixa de avanço utilizada.

Tabela 8 – Parâmetros de usinagem para a quarta série de testes

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]
1		1000	0,135	0,25
2		1000	0,135	0,50
3		1000	0,135	1,00
4		1000	0,187	0,25
5		1000	0,187	0,50
6		1000	0,187	1,00
7		1000	0,250	0,25
8		1000	0,250	0,50
9		1000	0,250	1,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tab. 9, verifica-se as grandezas definidas e utilizadas para a quinta série de testes, sendo utilizado o mesmo inserto do teste indicado pela Tab. 6, sendo utilizada a mesma rotação e alternância de profundidade de corte, com a alteração da faixa de avanço utilizada.

Tabela 9 – Parâmetros de usinagem para a quinta série de testes

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]
1		1600	0,135	0,25
2		1600	0,135	0,50
3		1600	0,135	1,00
4		1600	0,187	0,25
5		1600	0,187	0,50
6		1600	0,187	1,00
7		1600	0,250	0,25
8		1600	0,250	0,50
9		1600	0,250	1,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

Por fim, na Tab. 10, pode-se observar os parâmetros de usinagem utilizados para a sexta série de testes, sendo utilizado o mesmo inserto do teste indicado pela Tab. 7, sendo utilizada a mesma rotação e alternância de profundidade de corte, com a alteração da faixa de avanço utilizada.

Tabela 10 – Parâmetros de usinagem para a sexta série de testes

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]
1		2500	0,135	0,25
2		2500	0,135	0,50
3		2500	0,135	1,00
4		2500	0,187	0,25
5		2500	0,187	0,50
6		2500	0,187	1,00
7		2500	0,250	0,25
8		2500	0,250	0,50
9		2500	0,250	1,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

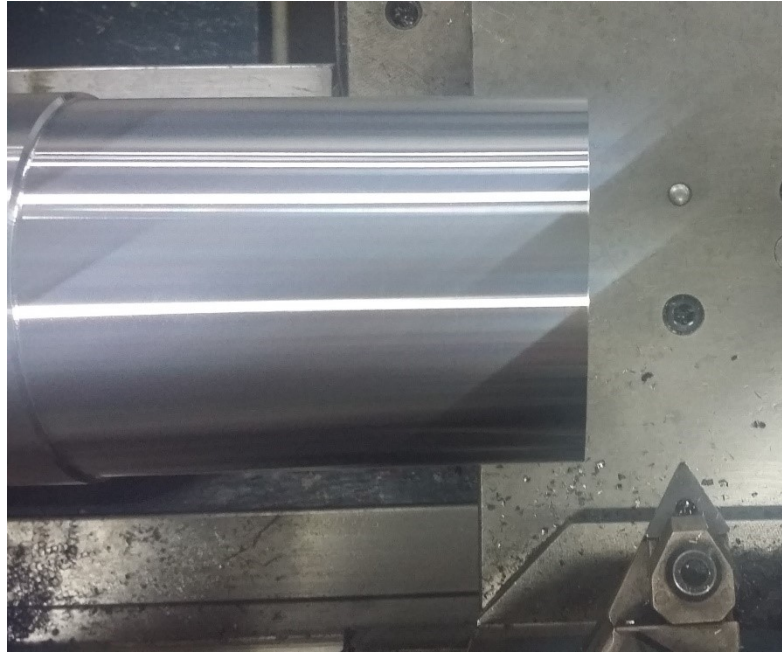
Antes dos testes principais supracitados, foi realizado uma série de testes preliminares onde foi utilizado um dos quatro insertos disponibilizados para o estudo, inserto este distinto dos demais empregados nos testes posteriores. Esta série teve como objetivo auxiliar na melhor definição das grandezas de corte, pela combinação de valores vistos tanto em catálogo quanto em estudos já realizados. As grandezas de corte utilizadas para tal apresentam-se na Tab. 11, e o posicionamento ferramental utilizado foi de $37^{\circ}24'$ com relação à superfície a ser usinada da peça, dispondo o inserto na direção neutra de corte, podendo ser observado na Fig. 20. Nesta série de testes, não foi possível a realização do nono experimento devido à condição de alta periculosidade, visto que os cavacos, os quais saíam na forma emaranhada e em fita, enovelavam-se pela peça e pela castanha em movimento.

Tabela 11 – Parâmetros de usinagem para o teste preliminar com o inserto cerâmico CW2015

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]
1		1000	0,057	0,25
2		1000	0,057	0,50
3		1000	0,057	1,00
4		1000	0,104	0,25
5		1000	0,104	0,50
6		1000	0,104	1,00
7		1000	0,166	0,25
8		1000	0,166	0,50

Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 20 – Direção de corte do inserto no teste preliminar



Fonte: Autoria própria, 2018.

A justificativa para o número de testes realizados é que o experimento, não se caracterizando como sendo um teste de vida (ou seja, utilização da capacidade total de usinagem do inserto para determinação do tempo de vida e otimização entre custo e produtividade em procedimentos de usinagem), foi conduzido apenas para observar o surgimento de possíveis danos e desgastes na ferramenta, objetivo este que foi alcançado com êxito.

3.4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS NA FERRAMENTA DE CORTE

Para a avaliação da integridade superficial das ferramentas, foram realizadas microscopias ópticas nos insertos utilizados, a fim de se observar eventuais danos e desgastes em suas superfícies. Os testes foram conduzidos em dois equipamentos distintos, sendo que as microscopias relacionadas aos três primeiros insertos foram realizadas no microscópio pertencente à Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Campus Curitiba, equipamento este sendo da marca Olympus, modelo BX60F5 com n° 7G00874, e lente de aumento da Olympus UMPlanFI 20x/0,40 BD P ∞ /0. As microscopias relacionadas aos três últimos testes foram realizadas no microscópio pertencente ao Laboratório de Ensaios dos Materiais,

H005 – Bloco H da UTFPR/PB, equipamento este sendo da marca Meiji, com número de fabricação 131238 e lente de aumento de 10x.

As imagens obtidas das micrografias realizadas foram analisadas e medições dos desgastes encontrados foram feitos com o auxílio do programa de análise de imagem Image-ProPlus 6.0, o qual oferece soluções em controles microscópicos, capturas de imagens, medições e ferramentas de desenvolvimento de macros.

4 RESULTADOS

Posterior à aquisição da superfície de referência no corpo de prova e da realização dos testes de dureza e rugosidade superficial, foram iniciados os testes experimentais com os insertos cerâmicos alvos deste estudo.

O teste preliminar realizado consistiu na utilização dos parâmetros previamente estabelecidos, estes já apresentados na Tab. 11, com direção de corte neutra, e os resultados obtidos seguem na Tab 12. As grandezas dependentes das variáveis primárias de profundidade, avanço e rotação foram calculadas de acordo com a equações (1), (2) e (3), e os valores medidos para a rugosidade média aritmética foram igualmente dispostos na tabela.

Tabela 12 – Resultados obtidos no teste preliminar

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μ m]			vc [m/min]	vf [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			
1	71,60	1000	0,057	0,25	85	0,318	0,307	0,355	224,94	57	0,81
2	71,36	1000	0,057	0,50	85	0,647	0,556	0,566	224,18	57	1,62
3	70,86	1000	0,057	1,00	85	1,056	1,051	1,047	222,61	57	3,25
4	69,86	1000	0,104	0,25	46	1,014	0,781	0,763	219,47	104	2,70
5	69,60	1000	0,104	0,50	46	0,856	0,836	0,886	218,65	104	5,41
6	69,10	1000	0,104	1,00	46	0,929	0,902	0,891	217,08	104	10,82
7	68,10	1000	0,166	0,25	30	0,888	0,922	0,883	213,94	166	6,89
8	67,86	1000	0,166	0,50	30	0,960	1,105	0,953	213,19	166	13,78

Fonte: Autoria própria, 2018.

Os valores do diâmetro inicial foram obtidos pela leitura com paquímetro analógico Digimess com escala 0,2mm a cada passe da peça no torno, e pode ser verificado que houve variação do resultado obtido pela leitura com o da diminuição aritmética da profundidade de corte com o valor anterior, e isso pode ser justificado pela escala do instrumento de medição não bater com a unidade decimal da profundidade de corte adotada, acumulando, assim, o erro centesimal. Esta justificativa pode se estender para os demais testes realizados.

Com relação à rugosidade superficial, é possível perceber que à medida que se eleva o valor da profundidade de corte para uma mesma rotação e mesmo avanço, o Ra e a TRM aumentam, diminuindo a qualidade superficial da peça. Analogamente, à medida que se eleva o valor do avanço, mantendo a mesma rotação e mesma profundidade de corte, os valores de Ra e TRM também aumentam, o que

já se pode deixar em aberto que, quanto maior a profundidade de corte e o avanço, maior a taxa de remoção de material, piorando a qualidade superficial.

Após os 8 testes, ao fazer a retirada do inserto do suporte o qual estava alocado, o inserto apresentou falha catastrófica, inutilizando seu uso para posteriores ensaios. A imagem do inserto pode ser observada na Fig. 21.

Figura 21 – Inserto cerâmico apresentando falha catastrófica



Fonte: Autoria própria, 2018.

Como justificativa para o ocorrido, pode-se sugerir que o inserto estava sendo utilizado com uma direção de corte não apropriada, principalmente devido ao suporte ser de orientação direita com leve inclinação da face primária de corte de 93° com relação à superfície usinada, havendo esforços maiores do que a tenacidade do material suporta, e com a possível presença de micro trincas ou desgastes já ocorridos na superfície do inserto devido aos processos de usinagem realizados, levou à falha catastrófica.

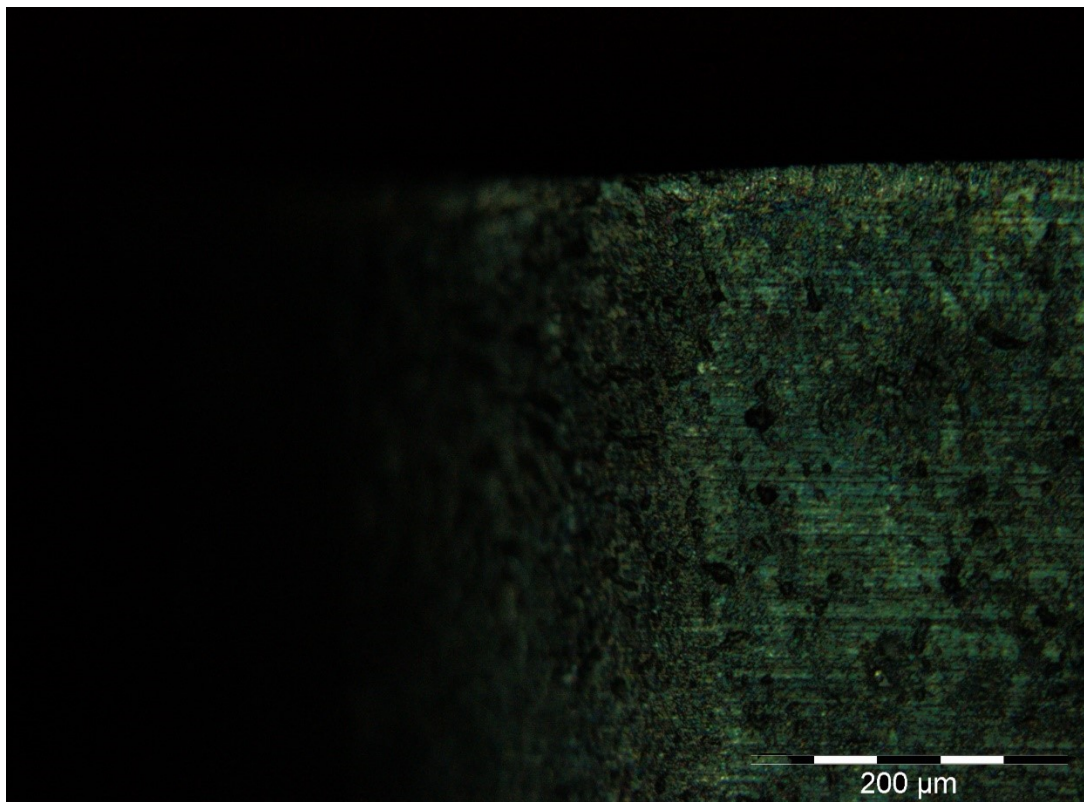
Na Fig. 22, é possível observar que houve desgaste de flanco sobre a preparação da aresta, resultante dos ensaios realizados, e se pode sugerir que na Fig. 23 houve o início de desgaste por abrasão, justificado pelas áreas circulares mais escuras, devido à falta de material na face.

Figura 22 – Microscopia do raio da ponta do inserto fragmentado



Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 23 – Microscopia da face primária de corte do inserto fragmentado



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com relação ao inserto pertencente a primeira série de testes, dos quais os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tab. 5, as grandezas dependentes e a rugosidade média aritmética encontram-se agrupadas na Tab. 13.

Tabela 13 – Resultados obtidos na primeira série de testes

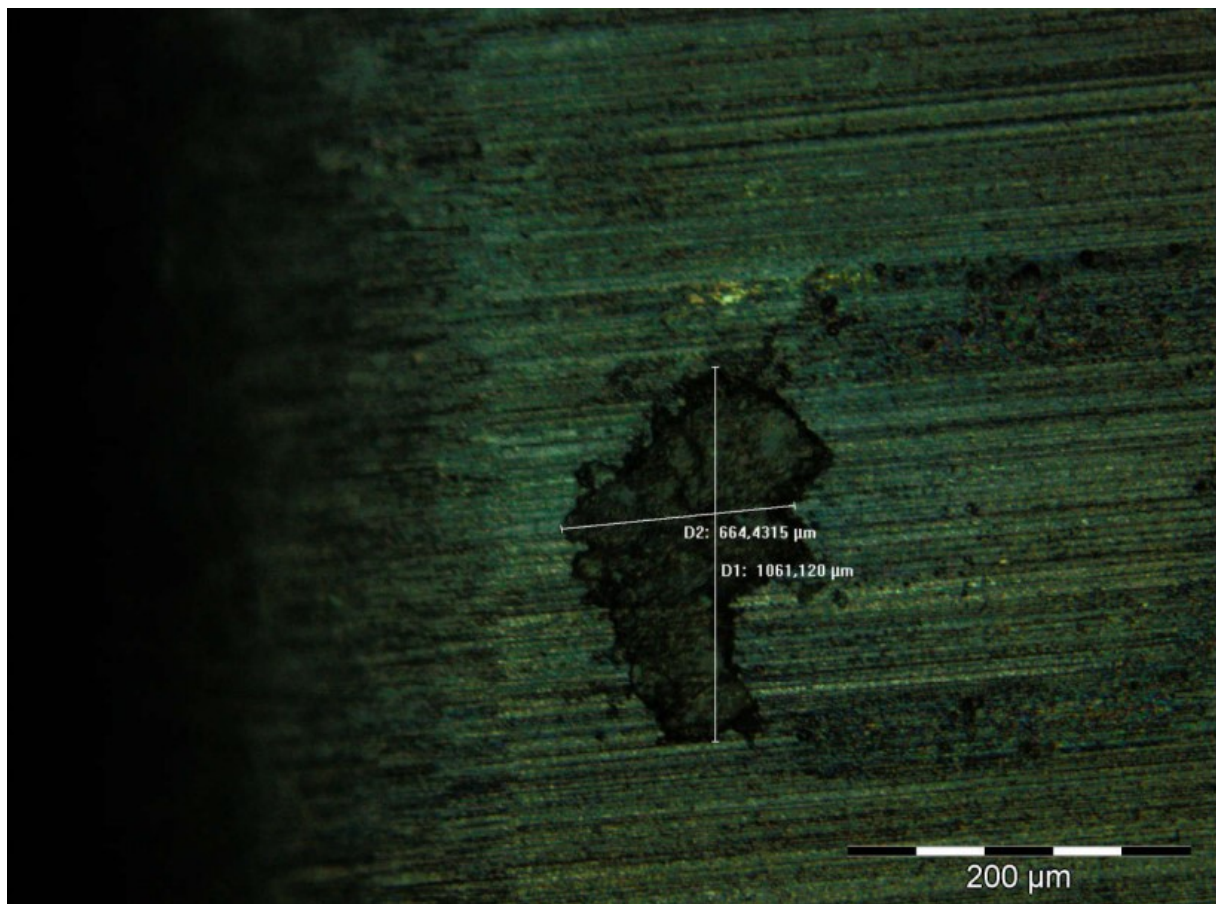
#	ϕ_i [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μm]			vc [m/min]	vf [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			
1	67,36	1000	0,057	0,25	88	0,373	0,382	0,385	211,62	57	3,02
2	67,14	1000	0,057	0,50	88	0,395	0,407	0,385	210,93	57	6,01
3	66,70	1000	0,057	1,00	88	0,559	0,542	0,644	209,54	57	11,94
4	65,74	1000	0,104	0,25	49	0,437	0,503	0,562	206,53	104	5,37
5	65,54	1000	0,104	0,50	49	0,561	0,575	0,534	205,90	104	10,71
6	65,10	1000	0,104	1,00	49	0,536	0,523	0,560	204,52	104	21,27
7	64,14	1000	0,166	0,25	30	0,701	0,738	0,737	201,50	166	8,36
8	63,92	1000	0,166	0,50	30	0,798	0,896	0,777	200,81	166	16,67
9	63,46	1000	0,166	1,00	30	0,803	0,822	0,805	199,37	166	33,09

Fonte: Autoria própria, 2018.

Pela análise do quadro acima, é possível concluir que, para a qualidade superficial da peça, a tendência é a mesma abordada no teste anterior, onde, com o aumento da profundidade de corte e do avanço, maior é a TRM e maior é o valor obtido de Ra , dificultando a busca por rugosidades menores. A faixa de rugosidade obtida com a rotação de 1000rpm variou entre 0,373 e 0,866 μm , que dependendo do critério de aceitação, é adequado e conveniente.

Através das microscopias realizadas, pode-se perceber pela Fig. 24 a presença do que se pode sugerir uma erosão causada pelo mecanismo de adesão, ou seja, porções do material da peça que aderiram à superfície da ferramenta e foram arrancadas durante o procedimento de usinagem, provocando a degradação parcial da face. Vale ressaltar que o desgaste ocorreu em uma área limitada da superfície do inserto, não apresentando indícios de outros tipos de desgaste em outras regiões, caracterizando o evento como sendo de caráter isolado.

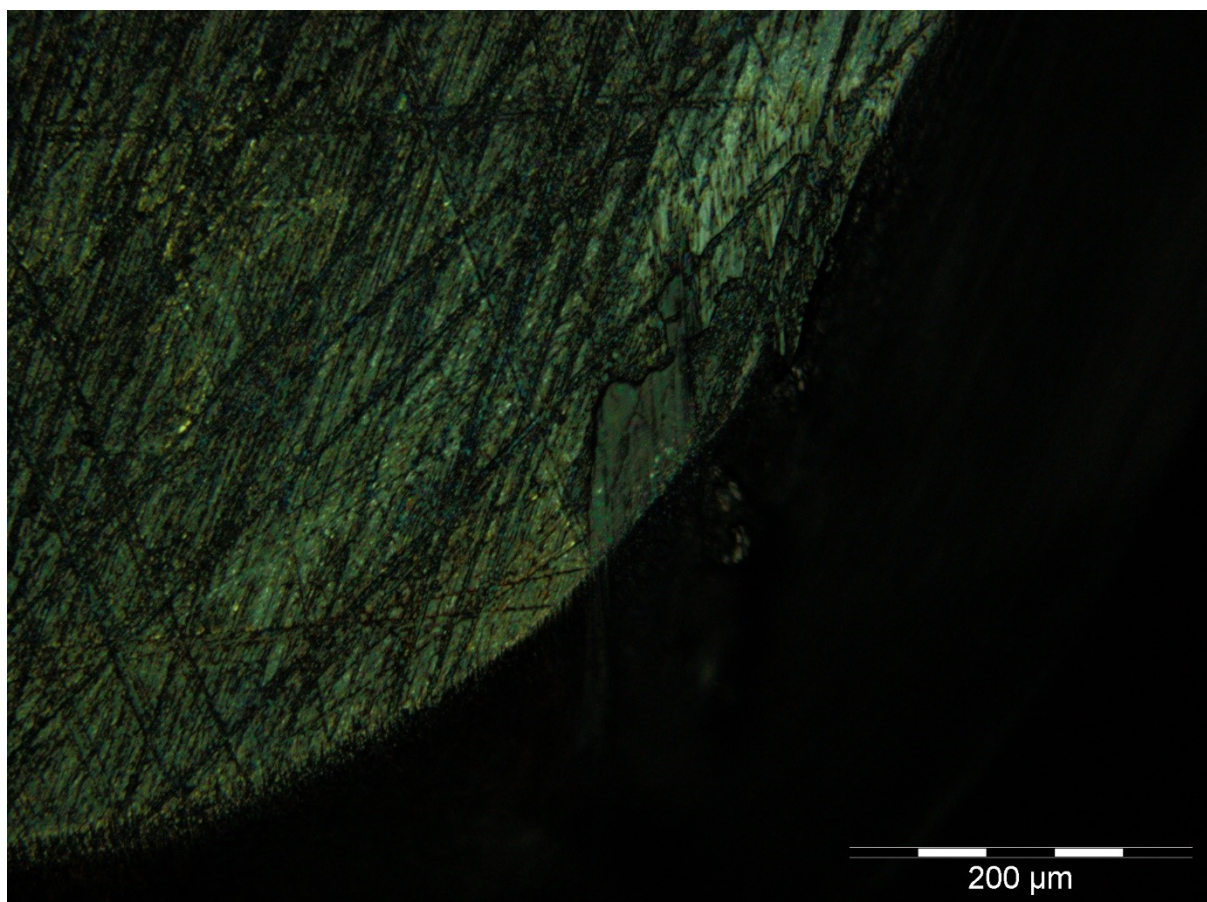
Figura 24 – Microscopia da face primária de corte do inserto da primeira série de ensaios



Fonte: Aatoria própria, 2018.

Na Fig. 25, é possível observar riscos aparentes na superfície de saída do inserto, provocados pela saída de material da peça, o que pode ser justificado pela realização de um tratamento térmico localizado no cavaco, pois levando em consideração que sua borda apresenta sempre temperatura mais elevada que seu interior, e seu conseqüente resfriamento se dá de forma mais rápida que o resto de seu corpo também, a superfície pertencente à periferia endurece, provocando os sulcos na face de saída da ferramenta. Além disso, é possível verificar a existência de pequenas protuberâncias localizadas próxima à aresta de corte, podendo sugerir a existência de pequenas arestas postiças de corte, que se caracterizam por pequenos fragmentos da peça que se desprendem e aderem à superfície da ferramenta, usinando o próprio material, e é causada também pelo mecanismo da adesão.

Figura 25 – Microscopia da superfície de saída do inserto da primeira série de ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com relação ao inserto pertencente a segunda série de testes, dos quais os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tab. 6, as grandezas dependentes e a rugosidade média aritmética encontram-se agrupadas na Tab. 14.

Tabela 14 – Resultados obtidos na segunda série de testes

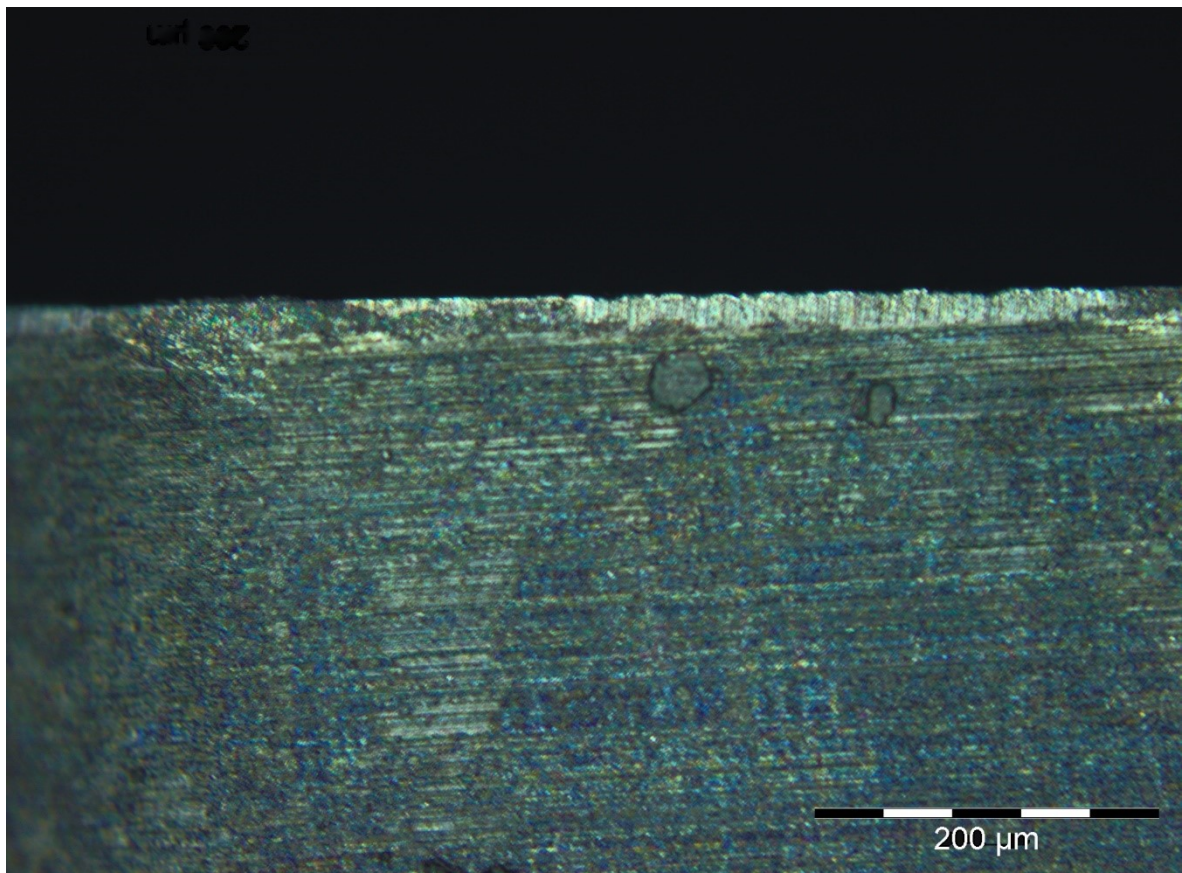
#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μ m]			vc [m/min]	vf [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			
1	62,50	1600	0,057	0,25	57	0,404	0,456	0,472	314,16	91,2	4,48
2	62,38	1600	0,057	0,50	57	0,578	0,591	0,605	313,56	91,2	8,94
3	61,92	1600	0,057	1,00	57	0,765	0,776	0,776	311,24	91,2	17,74
4	61,00	1600	0,104	0,25	31	0,723	0,729	0,729	306,62	166,4	7,97
5	60,82	1600	0,104	0,50	31	0,607	0,609	0,629	305,71	166,4	15,90
6	60,86	1600	0,104	1,00	31	0,590	0,586	0,609	305,92	166,4	31,82
7	59,86	1600	0,166	0,25	20	0,654	0,605	0,620	300,89	265,6	12,49
8	59,62	1600	0,166	0,50	20	0,672	0,652	0,761	299,68	265,6	24,87
9	59,10	1600	0,166	1,00	20	0,681	0,722	0,690	297,07	265,6	49,31

Fonte: Autoria própria, 2018.

Pela análise dos resultados, pode-se notar que, com o aumento da rotação, aumentou-se a velocidade de corte e o valor médio das rugosidades obtidas diminuiu, passando para uma faixa entre 0,404 a 0,776 μm , o que está de acordo com a tendência encontrada até então, e também com a literatura. A TRM aumenta à medida que aumenta a profundidade de corte e, analogamente, o avanço, o que pode contribuir para a medida de produtividade, mas que prejudica o estado da superfície da peça.

Pela Fig. 26, nota-se que a face principal de corte do inserto não apresenta sinais de desgaste ou danos significativos, a não ser um leve desgaste de flanco localizado próximo à aresta de corte e um indício de desgaste de cratera na região próxima à aresta. Cabe ressaltar que não se deve confundir a preparação da aresta de corte com algum tipo de desgaste, pois esse recurso é utilizado para dar o formato da aresta, intimamente relacionada com sua resistência. Essa preparação aumenta a vida útil da ferramenta e reduz quebras, apesar de induzir o aparecimento de desgaste frontal.

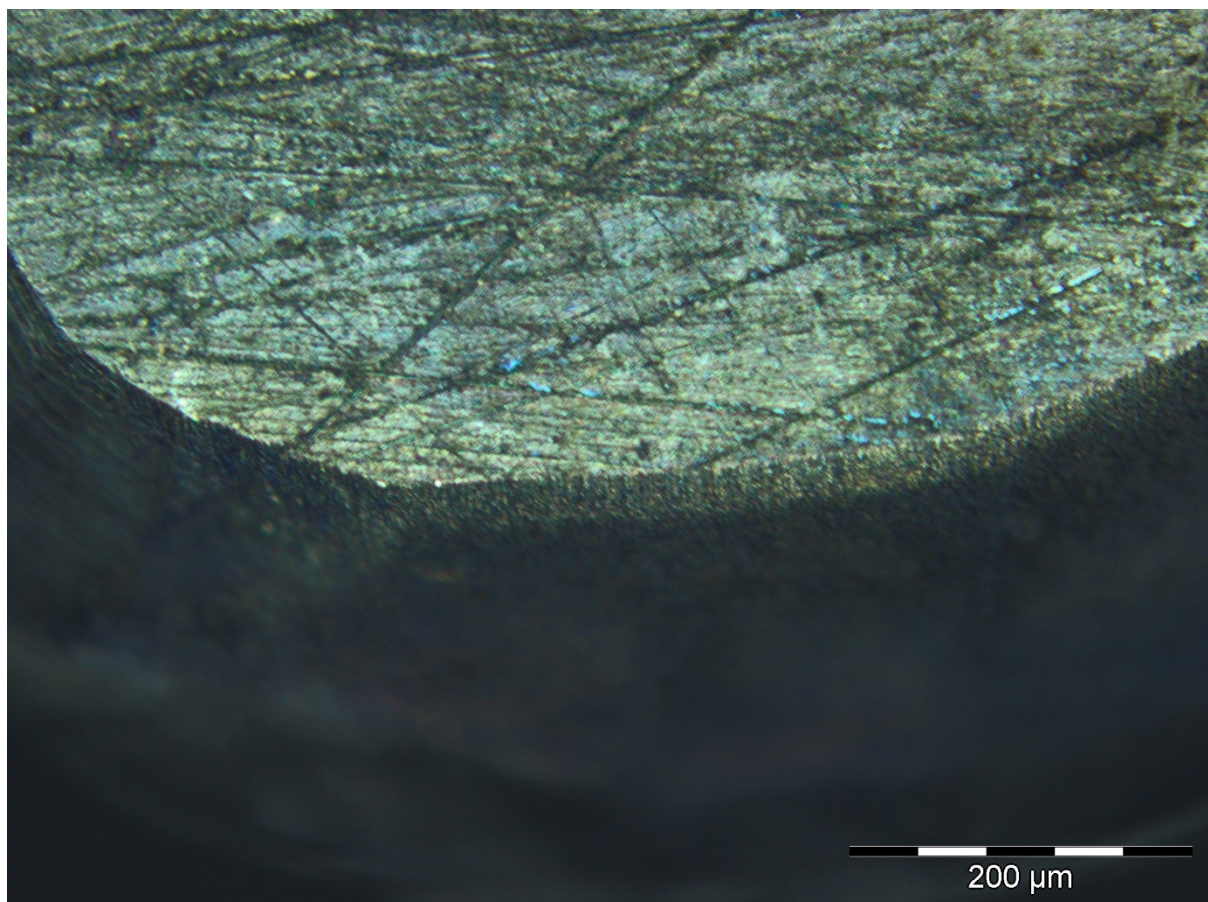
Figura 26 – Face primária de corte do inserto da segunda série de ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018.

De acordo com a Fig. 27, é possível identificar também sulcos consequentes do endurecimento superficial do cavaco, como ocorreu no caso anterior, o qual risca a superfície da ferramenta, mas que não apresenta probabilidade significativa de causar um dano catastrófico à mesma.

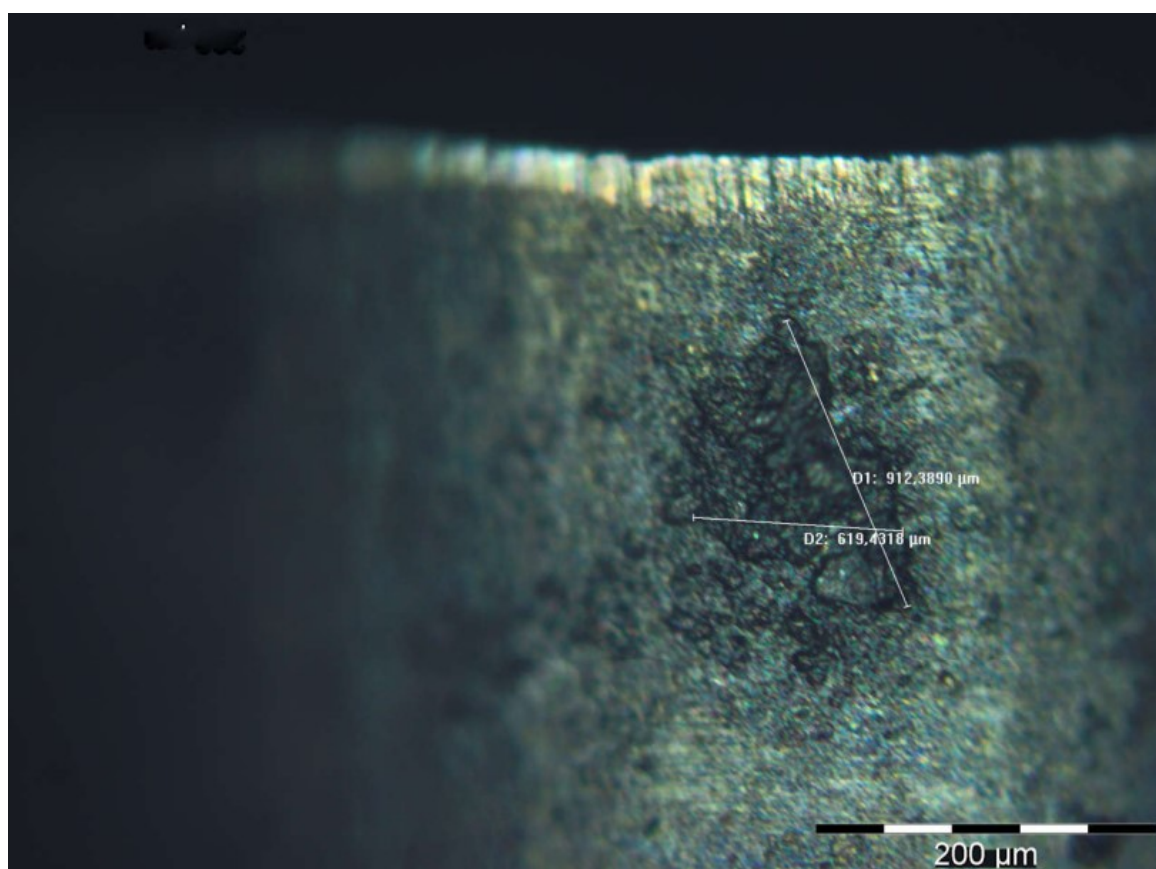
Figura 27 – Superfície de saída do inserto da segunda série de ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na região do raio da ponta (Fig. 28), nota-se o aparecimento do que se pode chamar de erosão, bem como no caso anterior, devido às mesmas circunstâncias já elucidadas, apontando para um aparecimento periódico de desgaste por abrasão.

Figura 28 – Raio da ponta do inserto da segunda série de testes



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com relação ao inserto pertencente a terceira série de testes, dos quais os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tab. 7, as grandezas dependentes e a rugosidade média aritmética encontram-se agrupadas na Tab. 15.

Tabela 15 – Resultados obtidos na terceira série de testes

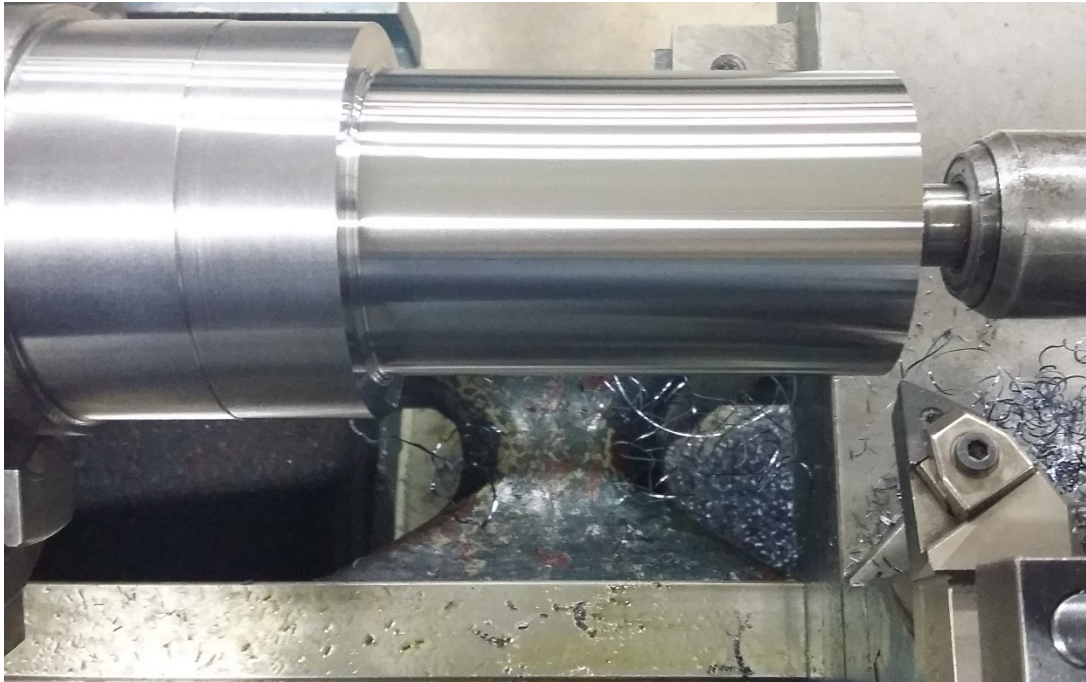
#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μ m]			vc [m/min]	vf [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			
1	58,10	2500	0,057	0,25	37	0,449	0,440	0,437	456,32	142,5	6,50
2	57,88	2500	0,057	0,50	37	0,465	0,467	0,455	454,59	142,5	12,96
3	57,40	2500	0,057	1,00	37	0,547	0,556	0,545	450,82	142,5	25,70
4	56,44	2500	0,104	0,25	20	0,604	0,611	0,613	443,28	260,0	11,53
5	56,20	2500	0,104	0,50	20	0,731	0,660	0,730	441,39	260,0	22,95
6	55,72	2500	0,104	1,00	20	0,691	0,701	0,727	437,62	260,0	45,51
7	54,78	2500	0,166	0,25	13	0,812	0,733	0,733	430,24	415,0	17,86
8	54,54	2500	0,166	0,50	13	0,832	0,744	0,831	428,36	415,0	35,55
9	54,10	2500	0,166	1,00	13	0,798	0,813	0,867	424,90	415,0	70,53

Fonte: Autoria própria, 2018.

Pela observação da tabela acima, nota-se que a tendência entre velocidade de corte, avanço, TRM e rugosidade superficial continua a mesma, promovendo mais

informações de cunho validativo. A faixa de valores para a rugosidade média aritmética variou entre 0,437 e 0,867 μm , qualificando o estado da superfície como sendo bom. Na Fig. 29 é possível observar o acabamento superficial da peça com um valor médio aproximado de 0,600 μm .

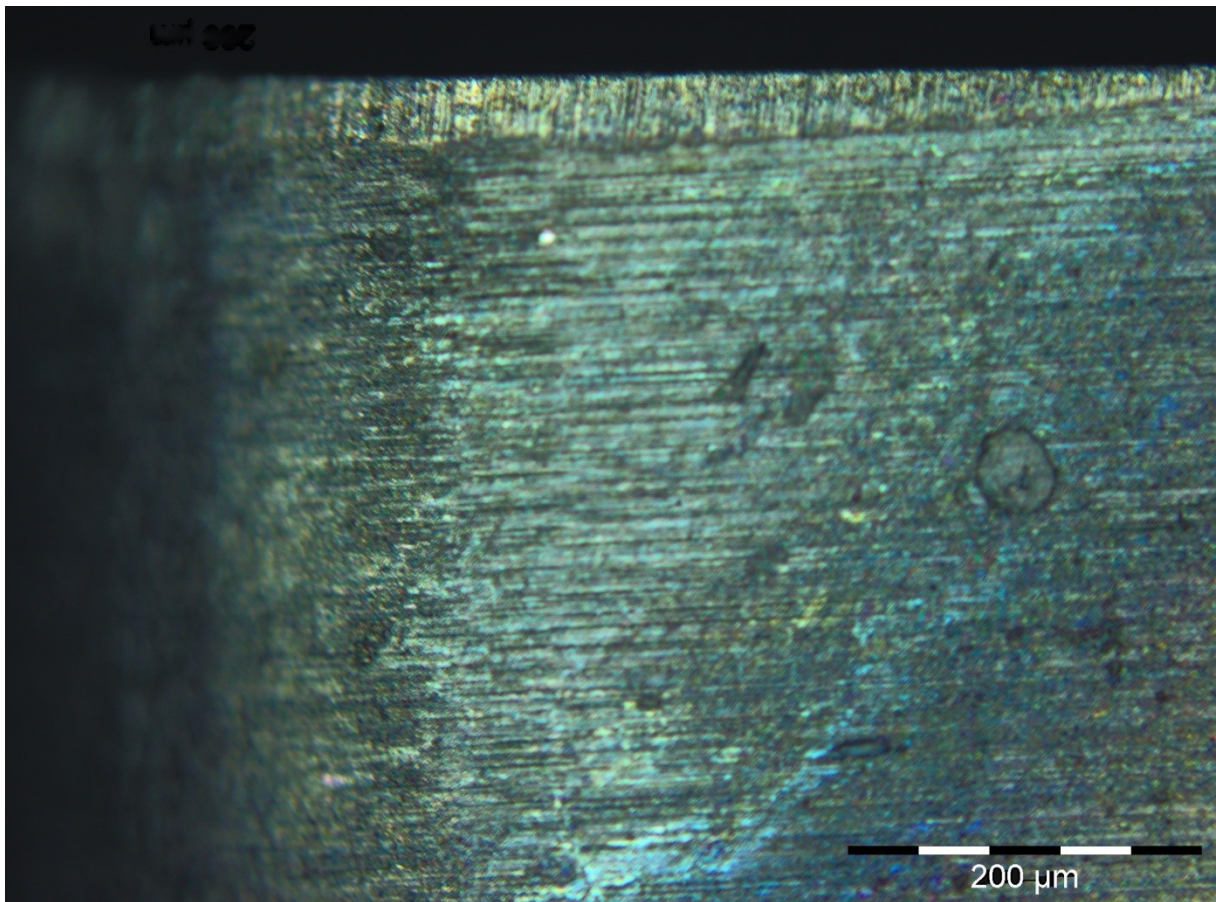
Figura 29 – Qualidade superficial referente ao valor médio aproximado de 0,600 μm



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Fig. 30 é evidente que o surgimento de danos causados à superfície começa a se tornar mais aparente. Nela, também há indícios de erosões, também podendo ser chamadas de crateras, que surge pela adesão e posterior retirada do material na superfície, justificados pela falta de resistência à tração do material da ferramenta. Além disso, é possível que o impacto do cavaco cause a remoção de material e provoque marcas sobre a face, assim como acontece a superfície de saída dos insertos.

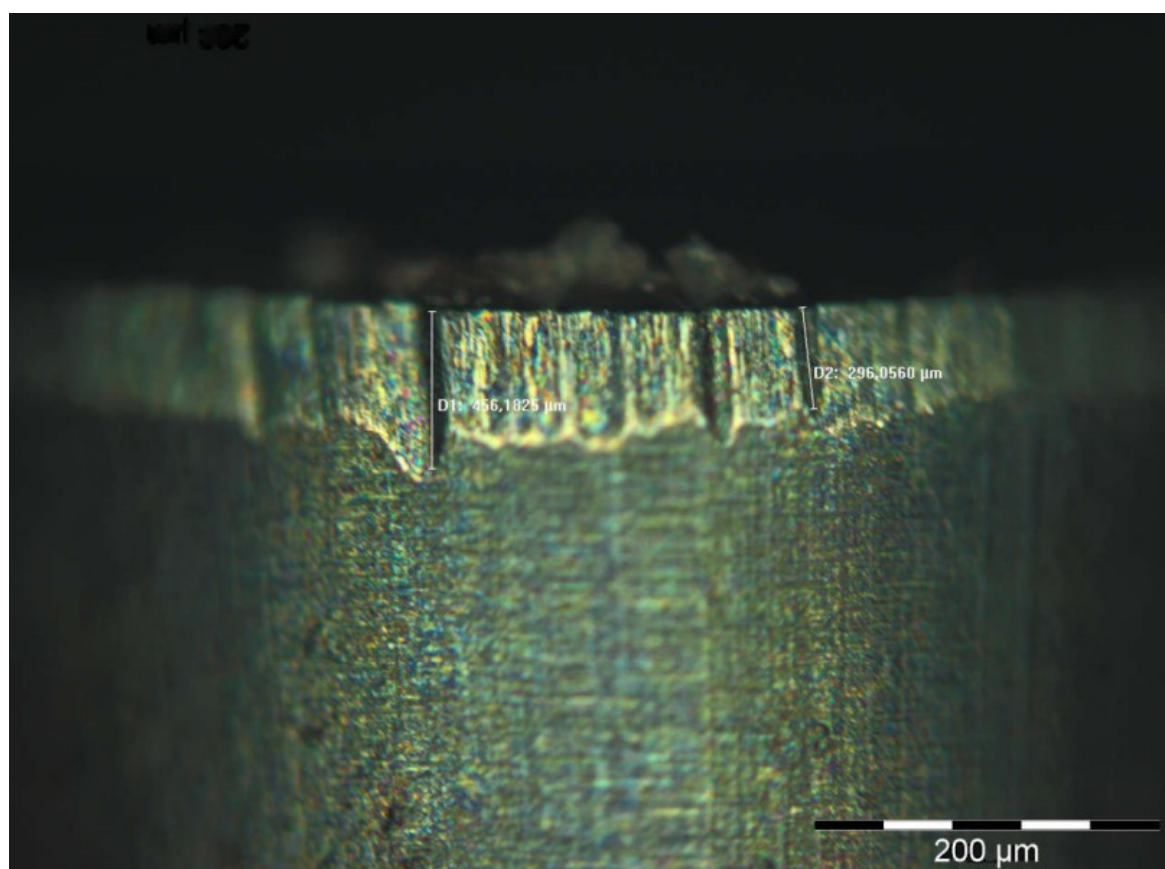
Figura 30 – Face primária de corte do inserto da terceira série de testes



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Fig. 31, pode-se visualizar a manifestação mais aparente do desgaste de flanco na aresta de corte. Neste caso, pode-se caracterizar os desgastes como sendo desgaste de flanco médio e desgaste de flanco máximo, devido ao critério de avaliação para exprimir o comprometimento da ferramenta para prosseguir com a operação de usinagem, sendo de $0,3\mu\text{m}$ para desgaste de flanco médio, e $0,6\mu\text{m}$ para desgaste de flanco máximo, valores expressos pela norma ISO 3685:1993.

Figura 31 – Região do raio da ponta do inserto da terceira série de testes



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com relação ao inserto pertencente a quarta série de testes, dos quais os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tab. 8, depois de ter sido realizado uma série prévia de experimentos no mesmo, as grandezas dependentes e a rugosidade média aritmética encontram-se agrupadas na Tab. 16.

Tabela 16 – Resultados obtidos na quarta série de testes

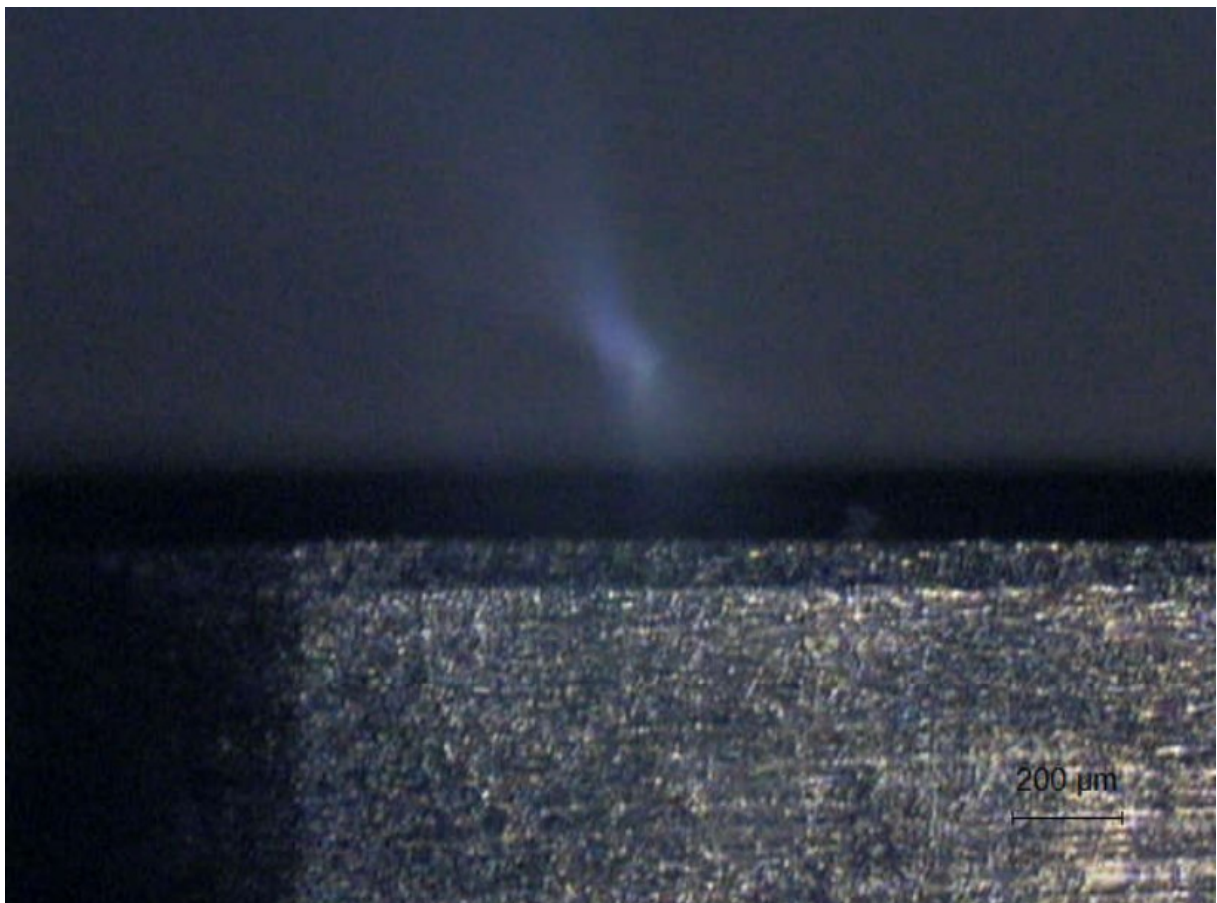
#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μm]			vc [m/min]	vf [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			
1	53,1	1000	0,135	0,25	38	0,700	0,628	0,470	166,82	135	5,63
2	52,88	1000	0,135	0,50	38	0,628	0,667	0,653	166,13	135	11,21
3	52,42	1000	0,135	1,00	38	0,741	0,749	0,763	164,68	135	22,23
4	51,46	1000	0,187	0,25	28	0,920	0,904	0,839	161,67	187	7,56
5	51,24	1000	0,187	0,50	28	0,994	0,900	0,968	160,98	187	15,05
6	50,8	1000	0,187	1,00	28	0,911	0,937	0,967	159,59	187	29,84
7	49,84	1000	0,250	0,25	21	1,285	1,318	1,307	156,58	250	9,79
8	49,62	1000	0,250	0,50	21	1,216	1,288	1,283	155,89	250	19,49
9	49,16	1000	0,250	1,00	21	1,315	1,368	1,326	154,44	250	38,61

Fonte: Autoria própria, 2018.

De acordo com a tabela acima, proporcional ao aumento da taxa de alimentação, utilizando uma mesma rotação em comparação com a primeira série de testes, os valores referentes ao Ra aumentaram, o que justifica a premissa de que o aumento do avanço, apesar de aumentar a produtividade, medida pelo índice TRM, é um parâmetro de corte que interfere negativamente na qualidade superficial de um componente, justificado pelo menor tempo de contato que a ferramenta tem com a peça.

Pela Fig. 32, é possível levantar a hipótese que, para o inserto em questão, depois de 18 testes realizados sobre o mesmo, ele não apresentou tanto desgaste na face primária de corte quanto se esperava, o que sugere que os parâmetros de corte definidos não atuaram severamente sobre ele.

Figura 32 – Microscopia da face primária de corte do inserto da quarta série de ensaios

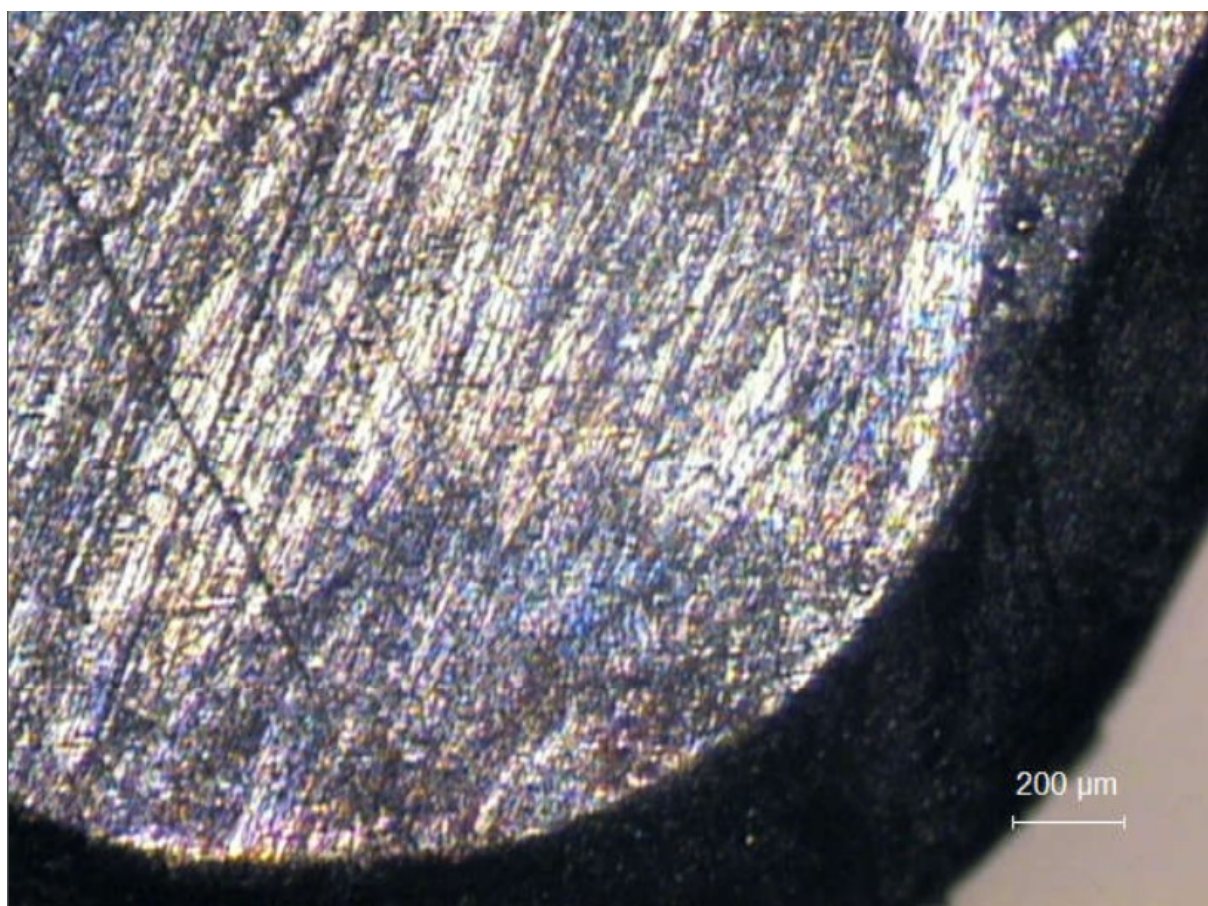


Fonte: Autoria própria, 2018.

Pela Fig. 33 pode-se verificar, além dos sulcos e marcas deixadas previamente pelo cavaco, a presença de áreas escurecidas, caracterizada pela alteração da cor da ferramenta devido ao calor gerado no processo, o que pode indicar

deposição de carbono sobre a superfície. Uma das propriedades dos materiais cerâmicos é que eles são refratários, ou seja, suportam elevadas temperaturas provenientes do processo que estão envolvidos, e o calor gerado pelo atrito na interface ferramenta-peça não é passado para a ferramenta, mas sim fica concentrado, devido à sua baixa condutividade térmica. Com isso, ocorre uma ligeira fusão local do material da peça, depositando resíduos na superfície da ferramenta, que logo carboniza-se. O carbono, em altas pressão e temperatura, encontra-se na estrutura cúbica, sendo um cristal duro e resistente, e com o aquecimento, ele passa a apresentar uma estrutura hexagonal compacta, que vira carvão ou grafite, que apresentam uma colocação preta característica. Portanto, a premissa de que a possibilidade de haver carbono depositado sobre a superfície é válida.

Figura 33 – Superfície de folga do inserto da quarta série de testes



Fonte: Autoria própria, 2018.

Em adição, o efeito que foi deixado sobre a face de saída, na microscopia, lembra um ligeiro deslocamento de material, caracterizado pela deformação plástica. O material cerâmico, dentre todas suas propriedades mecânicas, possui dureza

extremamente elevada, o que dificulta a viabilidade de ocorrer deformação plástica no mesmo, refutando a hipótese de ter havido deslocamento de material em sua camada mais superficial. Mais uma vez, a hipótese levada em consideração é a adesão de material em sua superfície.

Com relação ao inserto pertencente a quinta série de testes, dos quais os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tab. 9, depois de ter sido realizado uma série prévia de experimentos no mesmo, as grandezas dependentes e a rugosidade média aritmética encontram-se agrupadas na Tab. 17.

Tabela 17 – Resultados obtidos na quinta série de testes

#	ϕ [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μ m]			vc [m/min]	vf [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			
1	48,20	1600	0,135	0,25	25	0,584	0,518	0,453	242,28	216,0	8,18
2	47,98	1600	0,135	0,50	25	0,551	0,524	0,554	241,17	216,0	16,28
3	47,50	1600	0,135	1,00	25	0,622	0,564	0,646	238,76	216,0	32,23
4	46,54	1600	0,187	0,25	18	0,724	0,814	0,711	233,94	299,2	10,94
5	46,30	1600	0,187	0,50	18	0,808	0,727	0,757	232,73	299,2	21,76
6	45,82	1600	0,187	1,00	18	0,796	0,796	0,896	230,32	299,2	43,07
7	44,80	1600	0,250	0,25	14	1,674	1,702	1,688	225,19	400,0	14,07
8	44,58	1600	0,250	0,50	14	1,605	1,679	1,650	224,08	400,0	28,01
9	44,10	1600	0,250	1,00	14	1,625	1,740	1,582	221,67	400,0	55,42

Fonte: Autoria própria, 2018.

Mais uma vez, os resultados obtidos visualizados na tabela acima acompanha a tendência levantada anteriormente acerca da associação entre rotação, avanço e profundidade de corte com a qualidade superficial, representada em valores numéricos pela rugosidade média aritmética.

Na Fig. 34, a evidência de desgaste na face primária de corte é mais sólida, o que pode indicar tanto o fenômeno conhecido por *attrition* quanto o impacto de cavacos endurecidos na face. O *attrition* ocorre com bastante naturalidade na craterização de uma superfície, e é caracterizado pela aderência e arrastamento de material, sendo considerado uma variante da adesão.

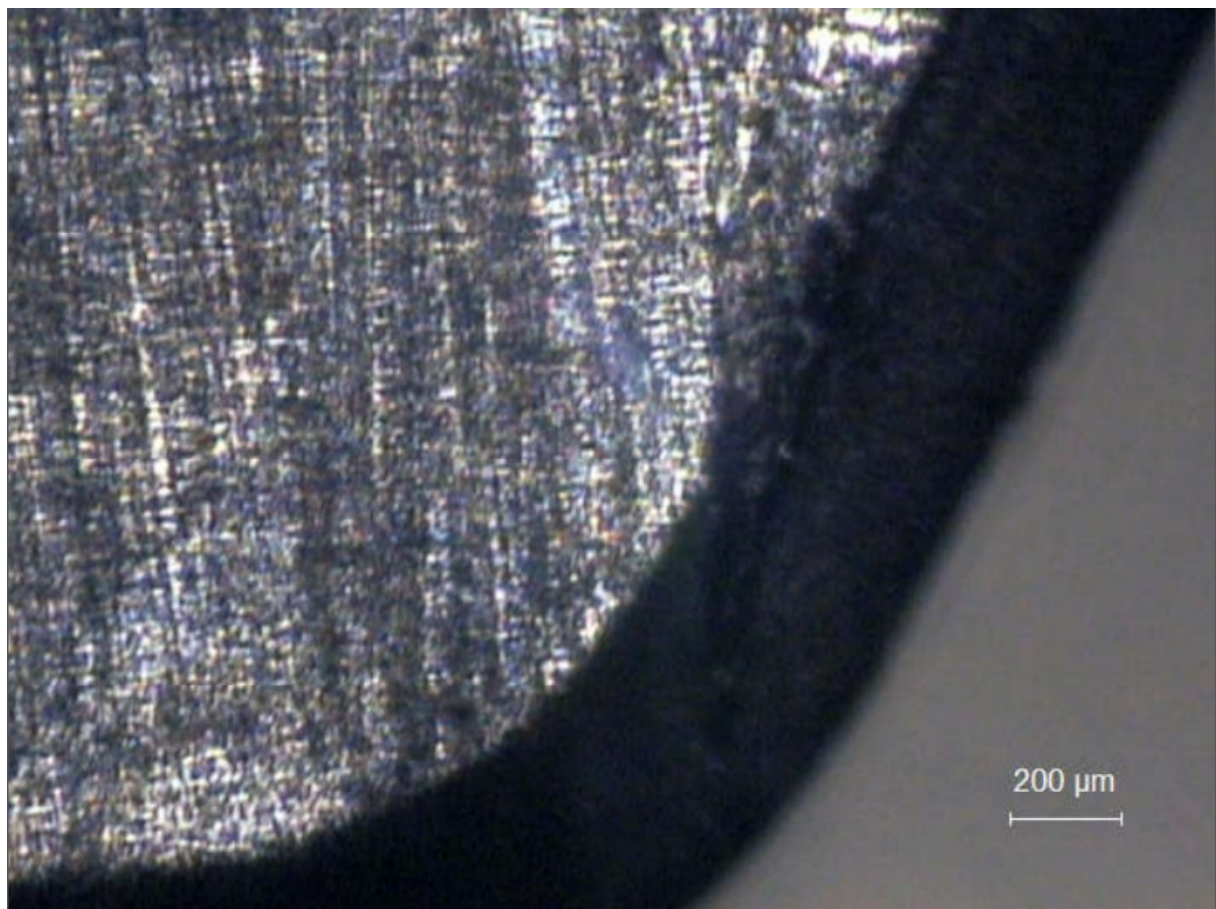
Figura 34 – Face primária de corte do inserto da quinta série de ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018.

Já na Fig. 35, a justificativa anterior é válida para este caso, visto que é possível haver a deposição do carbono na superfície, além de material aderido na superfície da ferramenta e reentrâncias devido à remoção de material pelo cavaco endurecido termicamente pela geração excessiva de calor na interface ferramenta-peça.

Figura 35 – Superfície de saída do inserto da quinta série de ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com relação ao inserto pertencente a sexta série de testes, dos quais os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tab. 10, depois de ter sido realizado uma série prévia de experimentos no mesmo, as grandezas dependentes e a rugosidade média aritmética encontram-se agrupadas na Tab. 18.

Tabela 18 – Resultados obtidos na sexta série de testes

#	ϕ_i [mm]	n [rpm]	f [mm/ver]	ap [mm]	Δt [s]	Ra [μm]			vc [m/min]	vf [mm/min]	TRM [mm ³ /min]
						0°	120°	240°			
1	43,14	2500	0,135	0,25	16	0,762	0,727	0,712	338,82	337,5	11,44
2	42,90	2500	0,135	0,50	16	0,666	0,596	0,632	336,94	337,5	22,74
3	42,42	2500	0,135	1,00	16	0,777	0,582	0,667	333,17	337,5	44,98
4	41,44	2500	0,187	0,25	12	0,995	0,942	0,906	325,47	467,5	15,22
5	41,20	2500	0,187	0,50	12	0,996	0,981	1,022	323,58	467,5	30,26
6	40,70	2500	0,187	1,00	12	1,071	1,119	1,060	319,66	467,5	59,78
7	39,72	2500	0,250	0,25	10	1,868	1,858	1,876	311,96	625,0	19,50
8	39,50	2500	0,250	0,50	10	1,894	1,803	1,833	310,23	625,0	38,78
9	39,00	2500	0,250	1,00	10	1,822	1,834	1,787	306,31	625,0	76,58

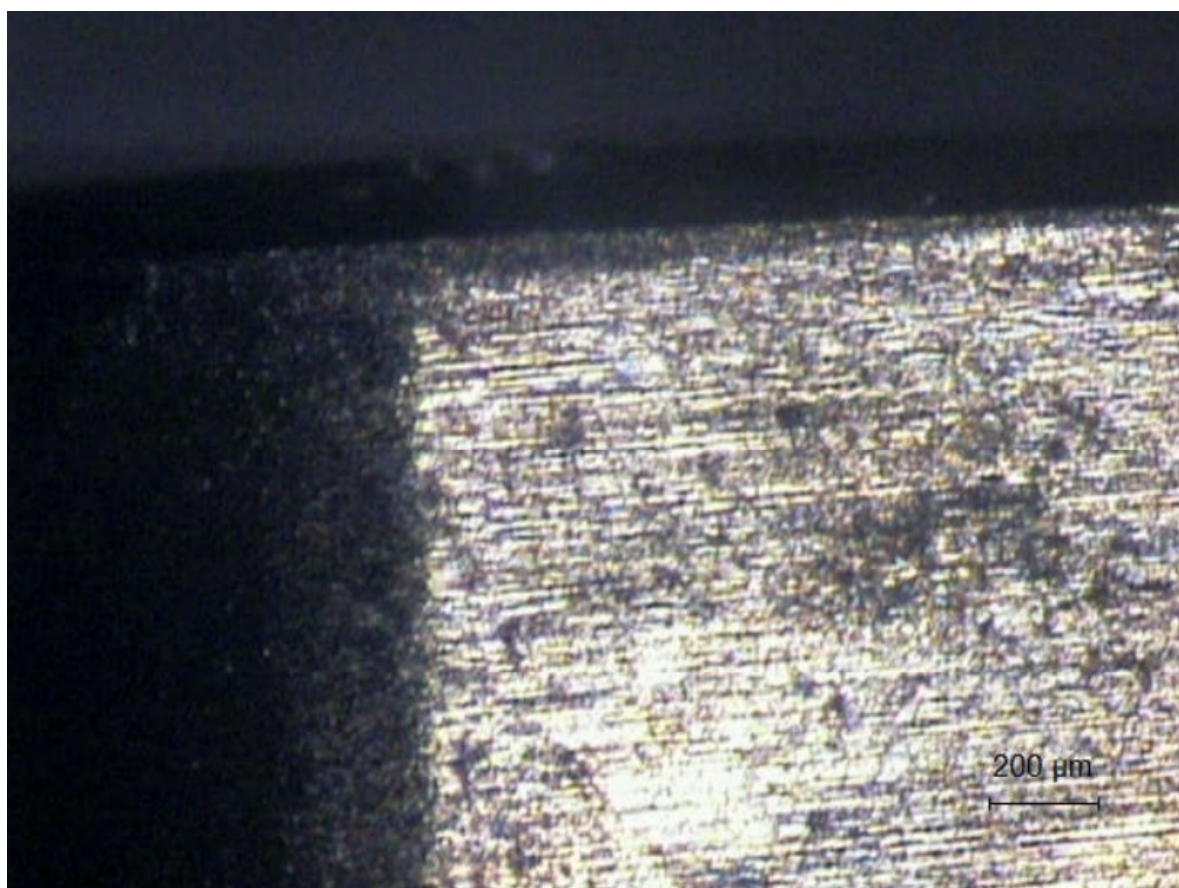
Fonte: Autoria própria, 2018.

Como observado anteriormente e sendo complementado pela literatura, a medida da rugosidade média aritmética é diretamente proporcional à mudança nos valores de avanço, profundidade de corte e rotação. Essa tendência foi observada em todos os testes conduzidos, corroborando, desta forma, a assertiva associada à alteração de parâmetros de corte para controle da qualidade superficial.

Na Fig. 36, onde mostra a face principal de corte, é possível observar danos à superfície, porém não é evidenciado muita informação de adesão de material, isto devido à geração de temperatura elevada e instabilidade na formação de arestas postizas de corte, as quais a formação é completamente instável. Isto indica que a vocação da ferramenta é para aplicações com velocidades de corte mais elevadas.

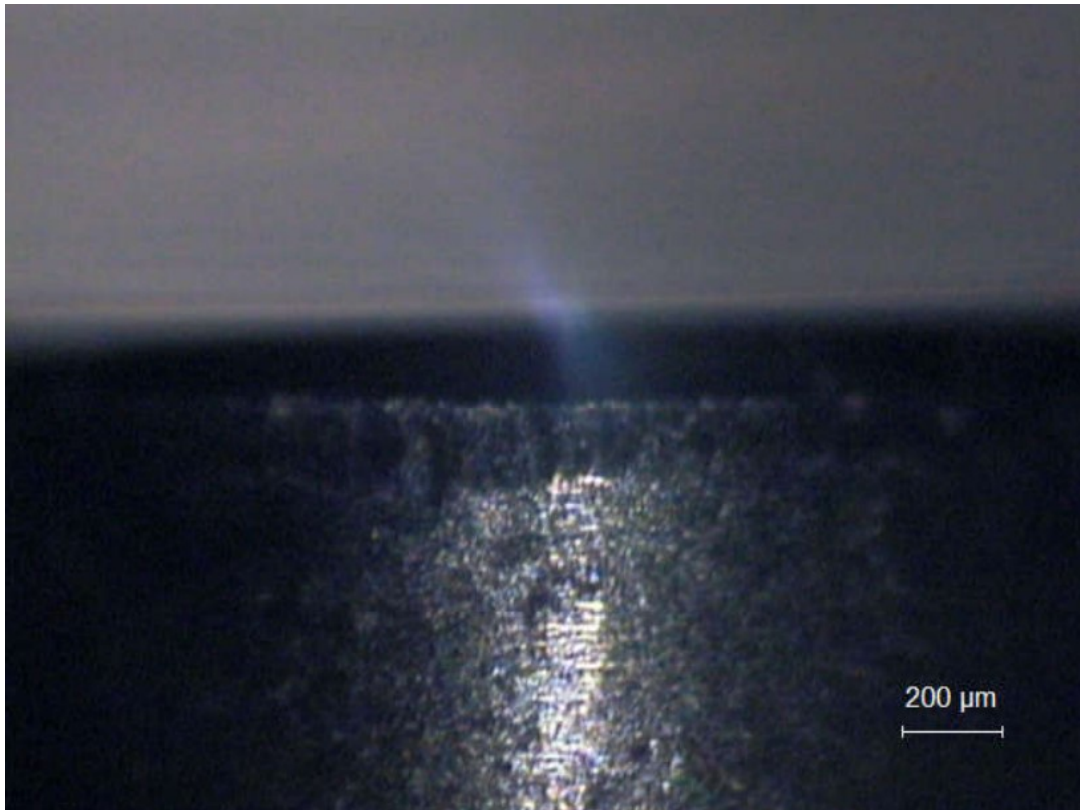
Na Fig. 37, nota-se desgaste no flanco da ferramenta, fenômeno que tem uma certa tendência a ocorrer, assim como foi observado em testes anteriores. Por fim, a Fig. 38 mostra o mesmo acontecimento ocorrido previamente, onde a ponta da ferramenta evidencia uma alteração em sua cor devido à deposição de carbono na superfície pelo calor gerado no processo de usinagem.

Figura 36 – Face primária de corte do inserto da sexta série de ensaios



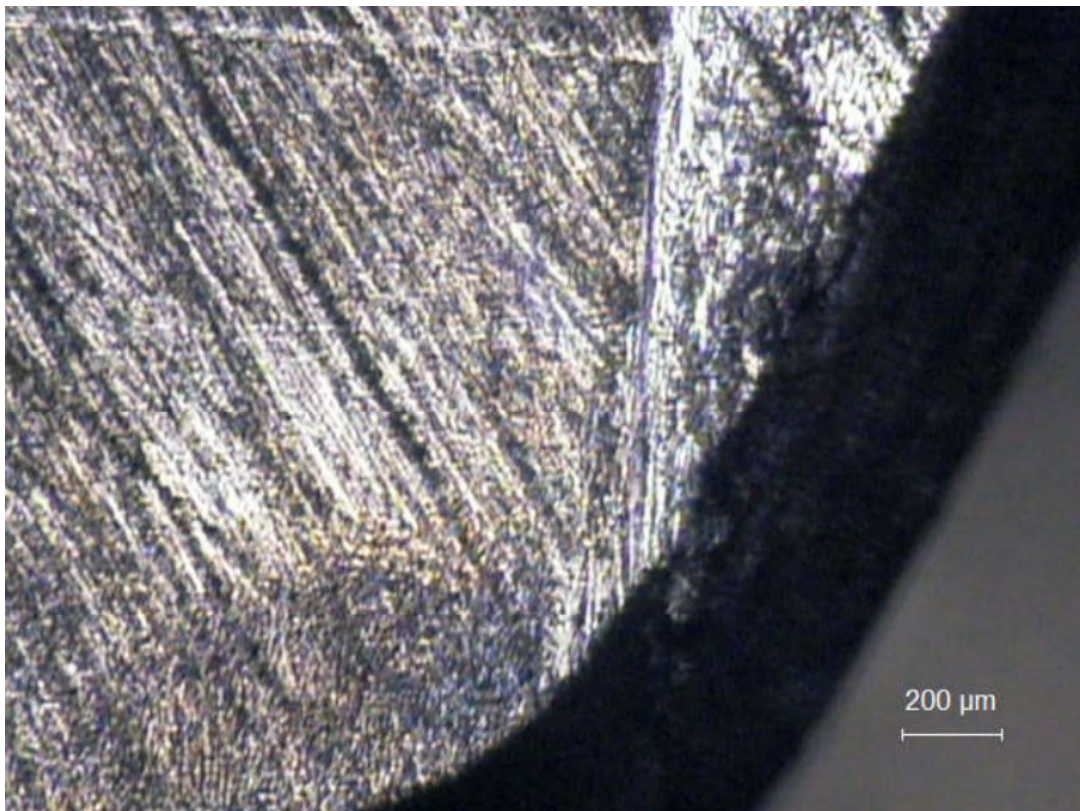
Fonte: Aatoria própria, 2018.

Figura 37 – Raio da ponta do inserto da sexta série de ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 38 – Superfície de saída do inserto da sexta série de ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018.

5 CONCLUSÕES

De acordo com o escopo primariamente estipulado para a execução deste trabalho, o qual abrangia o estudo e verificação de danos e avarias em inserto cerâmico na usinagem do aço AISI 8640, além de elucidar o uso do aço utilizado em substituição ao aço carbono comum, pode-se enunciar que os objetivos propostos foram atingidos.

Os ensaios experimentais que conduziram a investigação foram realizados de acordo com uma metodologia especificamente definida para o estudo e alicerçada na literatura e especificações técnicas, a fim de se obter resultados confiáveis e a repetibilidade do processo. Foram administradas sete séries de testes, resultando em 44 testes de torneamento, medições da rugosidade superficial e realização de micrografias ópticas para análise de danos e desgastes a nível microscópico.

Com relação à rugosidade, foi observado que há uma tendência de agravamento da qualidade superficial da peça pelo aumento da rugosidade média aritmética quando se eleva valores de profundidade de corte e avanço, assertiva já corroborada pela literatura e confirmada através deste estudo, caracterizando tais parâmetros como sendo diretamente proporcionais. Além disso, observou-se que a taxa de remoção de material também está intimamente ligada à condição superficial, sendo subordinada das variações de velocidade de corte ou avanço.

Já em relação ao vínculo com os danos e avarias presentes na ferramenta, foi constatado que, de acordo com determinados parâmetros de usinagem, desgastes de flanco e cratera são os que mais ocorrem com frequência, ditados por fenômenos como adesão e arrastamento de material sobre a superfície da ferramenta. Para velocidades de corte mais elevadas, não há indicação da presença periódica desses fenômenos, devido à instabilidade de formação de fragmentos dada pela elevada rotação de processo.

Por fim, foi verificado que as propriedades mecânicas pertencentes ao aço baixa liga AISI 8640 apresentam-se superiores em comparação com as do aço SAE 1045, devido à adição de elementos de liga, e sua vasta aplicação beneficia seu uso em uma ampla variedade de projetos. Com isso, considera-se favorável seu uso em substituição ao aço carbono comum de igual concentração de carbono.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparação de danos e desgastes obtidos na usinagem do aço AISI 8640 utilizando insertos cerâmico e de metal duro;
- Realização de testes de vida do inserto cerâmico ao se usinar o aço baixa liga AISI 8640;
- Comparação de danos e desgastes obtidos na usinagem dos aços AISI 8640 e SAE 1045 utilizando inserto cerâmico.

REFERÊNCIAS

- ARUNA, M.; DHANALAKSHMI, V.; MOHAN, S. Wear analysis of ceramic cutting tools in finish turning of Inconel 718. **International Journal of Engineering Science and Technology**, Índia, v. 9, no. 9, p. 4253-4262, 2010.
- ASLAN, E.; CAMUŞCU, N.; BIRGÖREN, B. Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool. **Materials & Design**, Turquia, 2006.
- ASLANTAS, K.; UCUN, I.; ÇICEK, A. Tool life and wear mechanism of coated and uncoated Al₂O₃/TiCN mixed ceramic tools in turning hardened alloy steel. **Wear**, Turquia, 2011.
- ÁVILA, R. F. DE.; ABRÃO, A. M. O efeito do uso de fluidos de corte na vida de ferramentas cerâmicas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15, 1999, Águas de Lindóia.
- BENSOUILAH, H. et al. Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. **Measurements**, Algéria, 2015.
- BIG TOOLS. **Catálogo Big Tools – Torneamento**. [201?]. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwiz8L3EvcnbAhWJGZAKHdO3DgYQFgg3MAI&url=http%3A%2F%2Fwww.bigtools.com.br%2Fpdf%2Fpdf.php&usg=AOvVaw2A8PZN55B3qIKRO2rygB_G>. Acesso em: 05 jun. 2018.
- BORTOLIN, E.; FREDDI, E. R.; SANTACATARINA, M. A. **Acabamento superficial-rugosidade**. [201?]. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAfa8sAC/acabamento-superficial-rugosidade>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- CAMUŞCU, N. Effect of cutting speed on the performance of Al₂O₃ based ceramic tools in turning nodular cast iron. **Materials & Design**, Turquia, 2005.
- CASTO, S. L. et al. Wear performance of ceramic cutting tool materials when cutting steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Itália, 1991.
- _____ et al. Wear rates and wear mechanisms of alumina-based tools cutting steel at a low cutting speed. **Wear**, Itália, v. 208, p. 67-72, 1997.

CEP, R.; BARISIC, B. Testing of ceramic cutting tools with an interrupted cut simulator. **Engineering Review**, Croácia, v. 28, no. 1, p- 11-16, 2008.

CHATTOPADHYAY, A. K.; CHATTOPADHYAY, A. B. Wear characteristics of ceramic cutting tools in machining steel. **Wear**, Índia, v. 93, p. 347-359, 1984.

CHENG, M. et al. Mechanical properties of two types of al₂o₃/tic ceramic cutting tool material at room and elevated temperatures. **Ceramics international**, China, 2017. In press.

CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

DAVIM, J. P.; FIGUEIRA, L. Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Portugal, v. 221, p. 625-633, 2007.

DEVERAS, A. M. Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas alisadora e convencional. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**, Paraná, set. 2017. Edição especial.

DIAS, A. M. DE P. et al. Aspectos nocivos de fluidos de corte utilizados em processos convencionais de usinagem. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 1., 2001, Curitiba.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5 ed. Local: Artliber, 2007. 242 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN ISO 4288:1997**: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method – Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture. Deutschland, 1998.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. **Aço SAE 8640**. [201?]. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-sae-8640>>. Acesso em: 22 set. 2017.

FREITAS, B. M. DE; VASCONCELOS, S. M. DE; MACEDO NETO, J. C. DE. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2016, Foz do Iguaçu.

GGD METALS. **SAE 8640**. [201?]. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-8640/>>. Acesso em: 22 set. 2017.

GRZESIK, W. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. **Wear**, Polônia, 2008.

_____. Wear of ceramic tools in hard machining. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Polônia, v. 26, no. 2, p. 127-130, 2008.

ISAKOV, E. **Cutting data for turning of steel**. 1 ed. Nova York: Industrial Press Inc., 2008. 316 p. Disponível em: < <https://www.livrebooks.com.br/livros/cutting-data-for-turning-of-steel-edmund-isakov-qahg1ou1cyec/baixar-ebook>>. Acesso em 22 set. 2017.

KUZLER, F. **Why ceramic cutting tools?**. Advanced Arena, Estados Unidos, 2012.

KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. **International Journey of Refractory Metals & Hard Materials**, Índia, 2003.

_____; _____. Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. **Tribology International**, Índia, v. 39, p. 191-197, 2006.

MACHADO, A. R.; MOTTA, M. F.; SILVA, M. B. DA. Performance of synthetic and mineral soluble oil when turning AISI 8640 steel. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Brasil, v. 119, p. 580-586, nov. 1997.

_____ et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2009. 371 p.

MAKEITFROM. **SAE-AISI 1045 Steel vs. SAE-AISI 8640 Steel**. [201?]. Disponível em: <<https://www.makeitfrom.com/compare/SAE-AISI-1045-S45C-G10450-Carbon-Steel/SAE-AISI-8640-SNCR240-G86400-Ni-Cr-Mo-Steel>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Liga de aço 8640**. [201?]. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/liga-de-aco-8640/>>. Acesso em: 26 set. 2017.

OKUSHIMA, K.; FUJII, Y. On ceramic cutting tool in the case of machining carbon steel. **Bulletin of JSME**, Japão, v. 2, no. 6, p. 217-223, 1959.

_____; _____. On the applications of Ceramics in Machining. **Bulletin of JSME**, Japão, v. 6, no. 24, p. 784-805, 1963.

ÖZEL, T. et al. Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, Estados Unidos, v. 189, p- 192-198, 2007.

QUALINOX. **Aços ligados**. [201?]. Disponível em: <<http://www.qualinox.com.br/acos-especiais-ligados.htm>>. Acesso em: 26 set. 2017.

RIBEIRO, M. V.; MALÈRE, E. P.; RIBEIRO, J. C. **Aplicação de ferramentas cerâmicas no torneamento de cilindros laminadores**. São Paulo, 2007.

RICHETTI, A et al. Influence of the number of inserts for tool evaluation in face milling of steels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Brasil, 2004.

RIGATTI, A. M. Y. Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte. In: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, 2010.

RUFATTO, F. **Ensaio e Caracterização de Materiais**. [2013?]. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABdzoAH/ensaios-caracterizacao-materiais-sae-8640>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

SANDVIK COROMANT. **ISO H Aços Endurecidos**. [201?]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_h_hardened_steel/pages/default.aspx>. Acesso em: 05 jun. 2018.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

SANTOS, C. L. DOS et al. Análise dos esforços e rugosidade quando alterados avanço e velocidade de corte no fresamento frontal do aço SAE 8640. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21., 2014, Cuiabá, p. 6470-6477.

SHEHAB, S. K.; MUBARAK, E. M. Study of the ceramic cutting tool performance using double rake face. **Dilaya Journal of Engineering Sciences**, Iraque, v. 1, no. 1, p. 1-18, 2008.

SILVEIRA, J. L. **Notas de Aula de Usinagem**. [201?]. Disponível em: <<http://www.mecanica.ufrj.br/util/b2evolution/media/blogs/joseluis/usinagem.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

TRENT, E. M. Treatise on materials science and technology. In: _____. Wear of Metal-Cutting Tools. Inglaterra: Academic Press, Inc, 1979.

VIEIRA, J. M.; MACHADO, A. R.; EZUGWU, E. O. Performance of cutting fluids during face milling of steels. **Journal of Materials Processing Technology**, Brasil, 2001.

VLEUGELS, J. Fabrication, wear and performance of ceramic cutting tools. **Advances in Science and Technology**, Suíça, v. 45, p. 1776-1785, 2006.

WIDIA. Master Catalog. 2017. Disponível em:
<https://www.widia.com/content/dam/kennametal/widia/common/resources/downloads/literature/WIDIA%20Catalogs/WIDIA%20Master%20Catalog%202017/WIDIA%20Master%20Catalog%202017%20Sections/A-15-04580_Master17_Catalog_Turning_Inch_LR.pdf>. Acesso em: 22 set. 2017.

WU, G. et al. Development of Al₂O₃/TiC/CaF₂ graded self-lubricating ceramic cutting tool materials. **Materials Science Forum**, China, v. 723, p. 258-263, 2012.