

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
FURG ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ GUIMARÃES CAMARGO

ANÁLISE DA FRESAGEM DO AÇO VC 131 COM INSERTO REDONDO DE PCBN

RIO GRANDE, RS

2022

ANDRÉ GUIMARÃES CAMARGO

ANÁLISE DA FRESAGEM DO AÇO VC 131 COM INSERTO REDONDO DE PCBN

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG como requisito para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”
– Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

RIO GRANDE, RS

2022

Ficha Catalográfica

C172a Camargo, André Guimarães.

Análise da fresagem do aço VC 131 com inserto redondo de PCBN / André Guimarães Camargo. – 2022.

74 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

Coorientador: Dr. Jorge Luis Braz Medeiros.

1. Nitreto Cúbico de Boro Policristalino 2. Usinagem CNC 3. CAM
I. Amaral, Fábio Augusto Dornelles do II. Medeiros, Jorge Luis Braz
III. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata n° 6/2022 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e um dias do mês de março de dois mil e vinte e dois, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando André Guimarães Camargo, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **Análise da fresagem do aço VC 131 com inserto redondo de PCBN**. Referendado pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Fábio Augusto Dornelles do Amaral, Jorge Luis Braz Medeiros e Boris Kluwe Niemczewski. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: Aprovado
2. Jorge Luis Braz Medeiros: Aprovado
3. Boris Kluwe Niemczewski: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____ CPF: 905.700.220-53	 Documento assinado digitalmente FÁBIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL Data: 21/03/2022 11:00:06-0300 Verifique em https://verificador.br.br	_____
2. _____ CPF: 588.871.210-87	 Documento assinado digitalmente JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS Data: 21/03/2022 15:38:29-0300 Verifique em https://verificador.br.br	_____
3. _____ CPF: 301.956.910-91	 Documento assinado digitalmente BORIS KLUWE NIEMCZEWSKI Data: 21/03/2022 11:00:10-0300 Verifique em https://verificador.br.br	_____
André Guimarães Camargo: _____	 Documento assinado digitalmente ANDRÉ GUIMARÃES CAMARGO Data: 21/03/2022 10:50:09-0300 Verifique em https://verificador.br.br	_____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a memória de minha querida mãe Eni Guimarães Camargo
...dizem que o tempo é o melhor remédio!!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por permitir resgatar um sonho que outrora não fora possível e me colocar no caminho de pessoas com quem pude aprender muito.

A minha mãe pela condição imposta com amor e no momento certo de dar continuidade aos estudos e ao meu Pai pelo exemplo e incentivo em seguir seus passos na mecânica.

Agradeço com todas minhas forças a minha alma gêmea, companheira de sempre e para sempre Vivian e aos meus filhos Caroline, Felipe e Camila pela ajuda e compreensão e companheirismo nessa trajetória.

A todos familiares que em algum momento incentivaram com uma palavra de apoio.

Em especial ao meu colega Prof. Fábio Rodrigues Pereira pela surpreendente vontade e disposição de ajudar e por todas perguntas que não eu não soube responder.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral pela paciência e confiança destinada a mim durante todo o processo.

Para meu coorientador Prof. Dr. Jorge Braz Medeiros por confiar e acreditar na minha capacidade.

A FAPERGS pelo aporte financeiro, vital para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao colega mestrando Marcel Farias Oliveira pela parceria durante todo o tempo de pesquisa.

Agradeço ao Prof. Boris Kluwe Niemczewski por ter sido meu primeiro professor de usinagem CNC e agora aceitar em participar de minha banca.

Aos colegas Prof. Frederico Trindade Grequi, Prof. Leonardo Vianna e Prof. Leonardo Lima pelo incentivo, presteza e palavra amiga na hora certa.

Ao coordenador Prof. Ricardo Carrilho e coordenador de área física Prof. Leonardo Soares por permitir e confiar a mim os equipamentos que utilizei no curso.

E a todos que tiveram um olhar amigo e fraterno durante esse tempo.

“Os semelhantes se atraem. Basta você ser o que é...isto repele naturalmente aqueles que nada tem a aprender com que somos nós, e atrai aqueles que têm, e com os quais podemos aprender também...”

..... (Richard Bach)

RESUMO

Processos que envolvem a usinagem com equipamentos com Comando Numérico Computadorizado (CNC) juntamente com auxílio de softwares de Manufatura Assistida por Computador (CAM) voltados para o desenvolvimento de tecnologia envolvendo aços de difícil usinabilidade e ainda utilizando ferramentas com insertos de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) e Metal Duro (MD) de geometria redonda, necessitam e possibilitam a realização de novas pesquisas. Neste contexto o objetivo principal deste trabalho é elaborar uma metodologia de usinagem utilizando software Edgcam para fazer a fresagem do aço VC 131 nos estados recozido/normalizado e temperado/revenido com inserto de PCBN e fazer comparação desses resultados e comportamentos com inserto MD. Além disso procura-se estudar os processos que envolvem a tecnologia de fresamento 3 eixos em aços endurecidos, compreender e investigar o desgaste do inserto utilizando como ferramenta as análises de rugosidade e de temperatura. Pode-se observar com os resultados um melhor desempenho no acabamento superficial e na durabilidade da usinagem com inserto de PCBN em relação ao inserto de MD, tanto para o aço VC 131 no estado recozido como para o estado temperado. Com a usinagem utilizando o inserto de PCBN no corpo de prova endurecido foi identificado os desgastes de flanco e de cratera, já na usinagem do corpo de prova recozido um desgaste de flanco com deformação plástica e adesão de material na superfície da aresta. Com o inserto de MD houve quebra da ferramenta no início do processo de usinagem corpo de prova endurecido, mostrando-se não indicado com os parâmetros adotados e do corpo de prova recozido foi identificado um desgaste de flanco que possibilitou três usinagens. O nível de vibração durante a usinagem foi o fator adotado para determinar o fim de cada ciclo preservando o conjunto do equipamento utilizado

Palavras- Chave: Nitreto Cúbico de Boro Policristalino, Usinagem CNC, CAM;

ABSTRACT

Processes that involve machining with Computer Numerical Control (CNC) equipment with the aid of Computer Aided Manufacturing (CAM) software aimed at the development of hardened steel machining with Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN) and Carbide (MD) round geometry inserts, still have a research camp to be enlightened. In this context, the main objective of this work is to develop a machining methodology using Edgcam software to mill VC 131 steel in annealed/normalized and quenched/tempered states with a PCBN insert and compare these results and behaviors with an MD insert. In addition to studying the processes involving 3-axis milling technology in hardened steels, understanding and investigating insert wear using roughness and temperature analysis as a tool. It can be observed with the results a better performance in the surface finish and in the machining time with PCBN insert in relation to the MD insert, both for VC 131 steel in the annealed state and for the tempered state. With the machining using the PCBN insert in the hardened specimen, flank and crater wear was identified, while in the machining of the annealed specimen, a flank wear with plastic deformation and material adhesion on the edge surface. With the MD insert, there was a tool breakage at the beginning of the machining process, showing that its use is not indicated in this condition. The annealed specimen showed flank wear that allowed three machining operations. The vibration level during machining was the factor adopted to determine the end of each cycle, preserving the set of equipment used.

Keywords: Polycrystalline Cubic Boron Nitride, CNC Machining, CAM;

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Designações para o aço VC 131.....	24
Figura 02	Exemplos de desgaste de Cratera, de Flanco, adesão metálica e entalhe.....	27
Figura 03	Rugosidade Média (Ra) NBR ISO 42:87:2002.....	28
Figura 04	Centro de usinagem SKYBULL.....	33
Figura 05	Posicionamento dos eixos.....	34
Figura 06	Geometria do corpo de prova.....	35
Figura 07	Estratégia de Usinagem “P1.....	36
Figura 08	Estratégia de usinagem “P2.....	37
Figura 09	Estratégia de usinagem “P3.....”	38
Figura 10	Estratégia de usinagem “P4.....”	38
Figura 11	Posições de leitura da rugosidade.....	39
Figura 12	Utilização Rugosímetro.....	40
Figura 13	Pontos de leitura da temperatura.....	41
Figura 14	Termômetro Digital Infravermelho D:S.....	42
Figura 15	a) Forno para Têmpera; b) Forno para Revenimento;.....	43
Figura 16	a) Forno de têmpera 950°C; b) Forno de revenimento 280°C;	43
Figura 17	a) Corpos de prova recozido; b) Corpos de prova 1ª revenida..	44
Figura 18	Temperatura nas posições: CP1 Recozido com PCBN.....	48
Figura 19	Rugosidade nas posições: CP1 Recozido com PCBN.....	49
Figura 20	Usinagem 06 com PCBN no corpo de prova 2 recozido.....	49
Figura 21	Desgaste inserto PCBN no CP2 Recozido, ampliação 130x.....	50
Figura 22	Temperatura nas posições: CP2 Recozido com PCBN.....	50
Figura 23	Rugosidade nas posições: CP2 Recozido com PCBN.....	51
Figura 24	Temperatura nas posições: CP1 Recozido com MD.....	53
Figura 25	Rugosidade nas posições: CP1 Recozido com MD.....	53
Figura 26	a) inserto MD sem uso; b) Desgaste inserto MD no CP revenido, ampliação 130x.....	54
Figura 27	Temperatura na usinagem com PCBN do CP temperado.....	57
Figura 28	Rugosidade na usinagem com PCBN do CP temperado.....	57
Figura 29	Microscópio Digital: a) inserto PCBN novo; b) inserto PCBN com desgaste. Ampliação.....	58

Figura 30	: Micrografia em MEV do inserto CBN2TTA1 com desgaste da usinagem CP endurecido. Ampliação x50.....	59
Figura 31	Micrografia em MEV do inserto PCBN com pouco desgaste na usinagem CP endurecido. Ampliação x1,000.....	59
Figura 32	IMD do inserto PCBN2TTA2. Ampliação 130x.....	60
Figura 33	Micrografia em MEV do inserto PCBN2TTA1. Ampliação x1,000.....	61
Figura 34	Micrografia em MEV do inserto PCBN2TTA2. Ampliação x1,000.....	61
Figura 35	Imagem MEV inserto CBN2TTA2.....	62
Figura 36	Temperatura usinagem inserto MD TT no CP3 endurecido.....	63
Figura 37	Rugosidade usinagem inserto MD TT no CP3 endurecido.....	64
Figura 38	Inserto de MD usinagem CP TT endurecido. Ampliação x100.	64
Figura 39	Inserto de MD usinagem CP TT endurecido. Ampliação x50...	65
Figura 40	Comparativo entre estratégias na posição TP1.....	65
Figura 41	Comparativo entre estratégias na posição TP2.....	66
Figura 42	Comparativo entre estratégias na posição TP3.....	66
Figura 43	Comparativo entre estratégias na posição TP4.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Composição química VC 131.....	24
Tabela 02	Dados do suporte da ferramenta.....	29
Tabela 03	Dados inserto Metal Duro.....	30
Tabela 04	Dados inserto CBN.....	32
Tabela 05	Características técnicas SKYBULL600.....	33
Tabela 06	Momento de leitura das temperaturas.....	41
Tabela 07	Escolha da temperatura de revenimento.....	44
Tabela 08	Sigla/Significados.....	45
Tabela 09	Valores das Temperaturas e Rugosidades com PCBN no CP1.....	46
Tabela 10	Valores das Temperaturas e Rugosidades com PCBN no CP2.....	46
Tabela 11	Leituras das temperaturas e rugosidades finais.....	47
Tabela 12	Valores das Temperaturas e Rugosidades com MD no CP2.....	52
Tabela 13	Leituras das temperaturas e rugosidades finais com MD.....	52
Tabela 14	Temperatura e Rugosidade na usinagem com PCBN no CP temperado.....	54
Tabela 15	Médias de temperatura e rugosidade na usinagem com PCBN do CP temperado.....	56
Tabela 16	Leitura Temperatura inserto MD do CP3 endurecido.....	62
Tabela 17	Médias temperatura da leitura tabela 16.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI- American Iron and Steel Institute
CAD- Desenho Assistido por Computador
CAD- Desenho Assistido por Computador
CAE- Engenharia Assistida por Computador
CAM- Manufatura Assistida por Computador
CBN- Nitreto Cúbico de Boro
CNC- Comando Numérico Computadorizado
CP- Corpo de Prova
et al- Mais de dois autores
FURG- Universidade Federal do Rio Grande
GL- Grau de Liberdade
HB-Dureza Brinell
HRC- Escala de Dureza Rochwell
HSM – Usinagem de Alta Velocidade
IFSul- Instituto Federal Sul-rio-grandense
IMD- Imagem Microscópica Digital
MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura
MO – Microscopia Optica
P- Posição
PCBN – Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
RP- Rugosidade na Posição
SAE- Society of Automotive Engineers International
TP- Temperatura na posição

LISTA DE SÍMBOLOS

Ra- Desvio aritmético médio da rugosidade no comprimento de avaliação

ap- Profundidade de corte

ae- Penetração de trabalho

f- Avanço

TiC - Carboneto de titânio

TiN- Nitreto de titânio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1 Fresagem CNC	20
3.2 Software CAM: Edgecam.....	21
3.4 Especificação do aço para trabalho a frio	22
3.4.1 Classificação Aço VC 131	23
3.5 Tratamento térmico do aço para trabalho a frio	25
3.6 Ferramenta PCBN.....	25
3.6.1 Mecanismo de desgaste em ferramentas de PCBN	26
3.7 Rugosidade	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Materiais	29
4.1.1 Ferramentas	29
4.2.2 Equipamento	32
4.1.3 Corpo de prova.....	34
4.2 Metodologia adotada.....	35
4.3 Elaboração das estratégias de usinagem	36
4.4 Metodologia de aquisição dos dados.....	39
4.4.1 Leitura da rugosidade.....	39
4.4.2 Leitura das temperaturas na usinagem	40
4.4.3 Análise do desgaste da ferramenta (MEV).....	42
4.4.4 Análise do desgaste por Imagem Microscopia Digital (IMD)	42
4.5 Tratamento Térmico	42
5. RESULTADO E DISCUSSÕES	45
5.1 Tabelas com as leituras das temperaturas e rugosidades.	45
5.1.1 Processo de usinagem com inserto de PCBN do CP1 recozido	46
5.1.2 Processo de usinagem com inserto de MD do CP recozido	51
5.1.3 Processo de usinagem com inserto de PCBN do CP endurecido	54
5.1.4 Processo de usinagem com inserto de MD do CP TT temperado e revenido	62
6. CONCLUSÕES.....	68
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

8.1 REFERÊNCIA NOMINAL.....	70
8.2 REFERÊNCIA POR EXTRATO	73
8.3 REFERÊNCIA POR DATA	73

1. INTRODUÇÃO

A busca pela melhor compreensão dos processos que envolvem a usinagem CNC, especialmente a usinagem dos aços endurecidos, muito utilizados na fabricação de matrizes e moldes, tem fomentado as pesquisas dos diversos fatores que influenciam estes processos de manufatura. Um destes fatores está relacionado ao funcionamento do equipamento, no que diz respeito a rigidez da estrutura mecânica dos centros de usinagem, dos recursos ferramentais e tipo de linguagem da programação. As estratégias de fabricação envolvem as rotinas de execução, os parâmetros de corte como, avanço, profundidade, largura e velocidade de corte (está gradativamente mais alta por influenciar diretamente, através do esforço de corte, a vida do inserto e conseqüentemente na produção). Por fim e não menos importante, a diminuição da utilização de líquidos para refrigeração devido ao impacto ambiental, a chamada usinagem verde e o desempenho das ferramentas que englobam os tipos de materiais e a geometria de corte dos insertos, que incidem pesado nos custos de produção.

Em relação aos materiais, os aços ferramenta apresentam grande importância no mercado mundial, a escolha do material e da classe da ferramenta de corte são fatores cruciais ao se planejar uma operação de usinagem bem-sucedida. Deve-se considerar a relação das propriedades desses materiais como resistência mecânica, dureza, tenacidade e resistência ao desgaste. Na prática, quer dizer que a ferramenta deve ser dura para aguentar o desgaste, porém tenaz para resistir a quebra, não deve ser reativo com o material usinado, mas para resistir a oxidação e a difusão deve ser quimicamente estável, sem falar que tem que ser resistente as mudanças térmicas repentinas do processo (SANDVIK,2019).

Esses aços ferramentas são utilizados na manufatura de diversos outros materiais, como por exemplo, ferramentas de corte, matrizes para forjamento e estampagem, moldes de injeção de polímeros, dentre outras aplicações (BORBA, 2016). A utilização de moldes e matrizes na indústria para a fabricação de bens de consumo é fundamental para a obtenção de produtos que visam preço, rapidez, acabamento superficial de alta qualidade e precisão geométrica. Materiais, estratégias de usinagem e perfis usinados são três características distintas de moldes e matrizes e têm uma influência substancial na demanda de ferramentas de corte (REVISTA FUNDAMENTAL,2019; SILVA, 2018).

Graças ao desenvolvimento de projetos avançados de produtos e de seus ferramentais através de softwares como CAD/CAM e a utilização de modernos Centros de Usinagem de múltiplos eixos, a fabricação de moldes, matrizes e ferramentas de corte é executada de forma

extremamente rápida. Isso é devido às características desse tipo de equipamento, como a alta taxa de remoção de material, a melhor qualidade dimensional das peças usinadas e a maior liberdade de orientação da ferramenta, no que diz respeito aos eixos, em relação ao material a ser fresado. Se no passado, para se produzir um molde através de máquinas-ferramenta convencionais, levavam-se meses para ficar pronto, com as modernas tecnologias disponíveis este período cai para alguns dias (FERRARI, 2019).

Esta pesquisa pretende contribuir um pouco para o melhor entendimento daqueles que precisam ou buscam desenvolver essa tecnologia envolvida no fresamento CNC. São enormes as possibilidades de pesquisa e desenvolvimento com esse equipamento, que vem corroborar com o estado da arte no que diz respeito à usinagem metal mecânica e também com o desenvolvimento da indústria 4.0 na região.

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, além da introdução, que serão brevemente descritos a seguir. No capítulo dois são apresentados os objetivos desta proposta. No capítulo três, temos a revisão bibliográfica que caracteriza a trajetória deste estudo. No capítulo quatro são apresentados os materiais e métodos a serem desenvolvidos, no quinto capítulo é abordado os resultados e discussões e para finalizar é apresentado as conclusões.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Elaborar uma metodologia de usinagem utilizando software Edgecam para fazer a fresagem do aço VC 131 recozido e temperado com inserto de PCBN e fazer comparações desses resultados e comportamentos com inserto de Metal Duro.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os processos que envolvem a tecnologia de fresamento 3 eixos em aço endurecido
- Compreender os tipos de mecanismos de desgaste do inserto PCBN de topo esférico, na usinagem do aço VC 131 endurecido;
- Investigar o desgaste do inserto utilizando como ferramenta a análise da rugosidade (Ra), temperatura, MEV e IMD.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Fresagem CNC

As recentes inovações tecnológicas nos meios de produção, distribuição de produtos e desenvolvimento de materiais estão promovendo grandes mudanças no setor produtivo (MORAIS,2016). A crescente demanda de produtos com superfícies complexas ou com formas harmônicas e ergonômicas impõem grandes desafios para as indústrias automobilística, aeronáutica, eletroeletrônicos e de moldes e matrizes, com relação à fabricação de produtos com menor tempo, melhor qualidade de acabamento e menor custo.

Para atender a essas exigências, as tecnologias embarcadas nas máquinas de usinagem em eixos simultâneos passaram dos convencionais 3 eixos, pois só apresentam 3 graus de liberdade (GL) de movimentos de translação paralelos aos três eixos cartesianos X, Y e Z, para 5 GL. Essas máquinas, conhecidas como centros de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) 5 eixos, oferecem maior liberdade de movimento entre ferramenta e peça. Além dos três GL de translação tradicionais, eles possuem dois eixos de rotação adicionais, que podem ser em torno de quaisquer eixos A(X) e B(Y) ou C(Z) (SOUZA,2006).

Essa tecnologia de usinagem CNC além da maior liberdade, possuem maior rigidez estrutural, automação de última geração tecnológica, elementos de transmissão e de movimentos das coordenadas de alta qualidade e tolerâncias dimensionais, guias e fusos de alto ajuste e precisão, ainda com linguagens de programação capazes de atender as diferentes necessidades e demandas dos diversos ramos da indústria, linguagem estas que se comunicam com os diferentes softwares CAD (Computer Aided Design)/CAE(Computer Aided Engineering)/CAM(Computer Aided Manufacture) ou são disponibilizadas no próprio equipamento com uma abordagem mais intuitiva. Todos esses recursos possibilitam por exemplo, realizar a usinagem de peças em bloco com uma menor necessidade de variação da fixação da peça na mesa do CNC.

Segundo Souza (2006), para a implementação de uma usinagem viável deste tipo de peça integral e de geometria tridimensional é necessário um volumoso conhecimento a respeito de estratégias de fresamento e dos parâmetros tecnológicos. A verificação de colisões e interferências de corte e a aplicação de estratégias eficientes são de crucial importância, assim como são as informações sobre as dificuldades impostas pelo material a ser usinado.

Toda essa flexibilidade faz com que o processo se torne mais complexo, trazendo algumas desvantagens, como a maior possibilidade de colisões e danos a peça, ferramenta e maquinário, como também a necessidade de uma programação e de pós-processadores mais complexos que exigem conhecimento e habilidade na operação e programação. Os custos para aquisição do software, do treinamento para qualificação do programador e para aquisição do equipamento também são outros fatores a considerar, porém sem os softwares e os pós-processadores a usinagem CNC torna-se mais limitada para executar peças com geometrias que envolvem movimentação simultânea dos eixos.

3.2 Software CAM: Edgecam

Edgecam é um software de manufatura assistida por computador (CAM) de propriedade da multinacional Vero e distribuída no Brasil pela SKA (CIMM, 2011), que possibilita gerar estratégias de usinagem e também o código CNC a partir de modelos CAD. Edgecam é um dos sistemas de manufatura mais universais, que evoluiu nos últimos anos. As melhorias mais expressivas são os diferentes comandos disponíveis (Fanuc, Heidenhein, Siemens, etc), o suporte de arquivos CAD de diferentes formatos, a disponibilidade de pós-processadores para ampla gama de máquinas e nas opções de fabricação de superfícies 3D complexas utilizando multieixos. As versões mais recentes dominam a fabricação multiaxial e o modo de simulação com estimativa precisa do tempo de produção. O software torna-se mais empregado por sua acessibilidade, requisitos de hardware e pela possibilidade de muitas maneiras diferentes de abordagem de fabricação de acordo com as necessidades reais do engenheiro de produção. Este sistema CAM é muito adequado para fins educacionais devido à dificuldade média e à filosofia geral de uso do software (BOTKO et al., 2015), , ainda possui a característica de ler um projeto CAD nativo do SOLIDWORKS exatamente como foi criado, permite ainda a análise rápida do modelo 3D com reconhecimento automático dos recursos facilitando a criação do G-code (SOLIDWORS, 2022).

3.4 Especificação do aço para trabalho a frio

Os aços para trabalhos a frio são classificados pela AISI e pela SAE em três distintas categorias:

- Grupo “O”: Aços de baixa liga, temperáveis em óleo;
- Grupo “A”: Aços de média liga, temperáveis ao ar;
- Grupo “D”: Aços de alto teor de carbono e cromo, temperáveis ao ar ou em óleo

Já na obtenção é possível constatar a complexidade dos aços ferramenta, sendo o principal motivo a quantidade de elementos de liga empregados como tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio e cobalto, que demanda um perfeito controle do processo siderúrgico de obtenção do aço, com o objetivo de se alcançar os teores corretos de liga e minimizar ao máximo os teores de impurezas no material, considerando claro os limites especificados nas normas(PAZ, 2016).

Se aplicam a conformação a frio de peças e componentes em aço, ferros fundidos e materiais não ferrosos. Destacam-se na fabricação de ferramentas que trabalham com corte, estampagem, extrusão, forjamento e injeção de ligas não-ferrosas e materiais poliméricos, ou seja, em operações que processam aços e materiais com dureza inferior (PAZ, 2016) na fabricação de ferramentas para dobramento, conformação, estampagens, extrusão, punção, matrizes de perfil, laminadores de rosca e ferramenta de calibração. Mantem as propriedades mecânicas mesmo quando expostos a temperaturas superiores a 250°C, devido não apresentar elementos de ligas em teores suficientes que possam promover o endurecimento secundário, exceção para aços com alto C - alto Cr (JUNIOR, 2006)

Essa exceção de aço é pertencente ao Grupo “D” e esse grupo de aço tem como características possuírem em sua composição química elevado teor de carbono (1,50 a 2,35%) e elevado teor de cromo (12%), além de conterem outros elementos de liga como vanádio, silício, cobalto, manganês, molibdênio e tungstênio (RODRIGUES et al., 2015)(ACCADROLI, 2020). Os aços pertencentes ao Grupo “D” denotam propriedades mecânicas como a elevada resistência ao desgaste devido a presença de carbonetos, tenacidade e possui também alta estabilidade dimensional (JUNIOR, 2017) além de tais propriedades, admitem grande profundidade de endurecimento (esses aços são temperáveis em temperaturas entre 955 a 1040°C (ACCADROLI, 2020).

3.4.1 Classificação Aço VC 131

É classificado como um aço ferramenta para trabalho a frio com elevada temperabilidade, alta estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste, alto grau de indeformabilidade e boa tenacidade, especialmente em condições abrasivas (FAVORIT,2019).

Segundo Junior (2017), esse tipo de aço é caracterizado por apresentar propriedades adequadas para a produção de ferramentas, como pequenas alterações na forma e nas dimensões durante o tratamento térmico, razão pela qual são chamados indeformáveis. Possui dureza de utilização que pode chegar a 62 HRC, porém é fornecido no estado recozido, com dureza máxima de 24 HRC.

Tem como aplicação matriz de corte, facas e tesouras de alto rendimento, para cortes de chapas de aço silício e chapas de aço de até 4 mm de espessura, estampos de corte com precisão para a indústria de papel, placas de revestimento de moldes para tijolos e ladrilhos, ferramentas para prensagem de pós-metálicos e materiais altamente abrasivos, guias para máquinas operatrizes, régua para retificadoras, peças de desgaste de calibres, micrômetros e ferramentas em geral, que exige a máxima resistência à abrasão e retenção de corte (VILLARES,2019).

Possui aços similares nas denominações DIN X 210 CrW 12; Wnr 1.2436; AISI D6; ABNT D6; JIS G 4404-72; Tipo SDK 2. A composição química do aço VC 131 está descrita na tabela 01, as denominações na a figura 01 e o efeito dos principais elementos de liga da composição do aço estão descritos a seguir:

- Carbono (C): Na formação dos carbonetos, o carbono tem um papel essencial que confere dureza e resistência ao desgaste. Quanto mais elevado o teor de carbono, maior a quantidade de austenita retida na têmpera, exigindo temperaturas de revenido mais elevadas e tempos de revenimento mais longos. Durante o aquecimento para o tratamento térmico, o teor de C elevado favorece a tendência à decarbonetação. Para isso se faz necessário tomar precauções no sentido de evitar, como por exemplo, utilizando forno com atmosfera controlada. Pode-se concluir que o alto teor de carbono do aço VC 131 pode piorar a usinabilidade, provocando um forte desgaste da ferramenta.

- Cromo (Cr): Adicionado, principalmente, para aumentar a temperabilidade, tornando, junto com o Mn, o aço temperável em óleo. Aumenta a resistência ao desgaste, porque aumenta a dureza, sem prejudicar sensivelmente a ductilidade.

- Tungstênio (W): Formador de carbonetos. Sua principal característica é conferir a dureza a quente, isto é, capacidade de retenção da dureza até temperaturas da ordem de 600°C.

Ainda que o W seja o elemento mais eficiente na dureza a quente, a obtenção desta característica é mais efetiva quando se adiciona juntamente com V ou Cr.

- Vanádio (V): Forma carbonetos estáveis e melhora a temperabilidade dos aços ferramenta. O carboneto formado pelo vanádio é considerado o carboneto mais duro encontrado nos aços, com dureza superior ao carboneto de cromo, ao tungstênio ou ao óxido de alumínio. O principal efeito é impedir o crescimento do grão, refinando-o e, também, atua na melhora da dureza a quente. O refino de grão aumenta a dureza, resistência mecânica e, também, a tenacidade do material o que piora a usinabilidade. Elementos de liga formadores de carbonetos tais como Cromo, Tungstênio e Vanádio são responsáveis pelo forte desgaste de ferramentas durante a usinagem o que piora a usinabilidade, quanto ao critério do tempo útil da ferramenta (JUNIOR,2017).

Tabela 01 :Composição química VC 131

C	Cr	W	V
2,10	11,5	0,70	0,15

Fonte: adaptado SILVA et al. 2016.

Figura 01: Designações para o aço VC 131

ABNT	AISI	GERDAU	VILLARES	DIN
D6	D6	D6	VC 131	X 210 CrW 12

Fonte: JUNIOR, 2017

3.5 Tratamento térmico do aço para trabalho a frio

Segundo Junior (2006) a aplicabilidade dos aços ferramentas depois das sequências de tratamentos de austenitização, têmpera e revenido se esteia na demanda desses materiais resistirem aos fenômenos de desgaste existentes nas operações que abrangem fabricação de ferramentas, associando dureza e tenacidade. Tratamentos térmicos podem ser definidos como processos utilizados para modificação da estrutura interna ou obtenção de nova formação estrutural do material (SILVA et al 2016).

Conforme Sacramento et al (2019) a têmpera é um processo de tratamento térmico de aços para aumentar a dureza e a resistência dos mesmos e possui duas etapas: aquecimento e esfriamento rápido. O aquecimento tem como meta obter a organização dos cristais do metal, fase chamada austenitização, já o esfriamento brusco visa obter a estrutura martensita. Na têmpera o aquecimento é maior que à temperatura crítica de 727°C. A finalidade é conduzir o aço a uma fase, na qual se obtém o melhor arranjo possível dos cristais do aço, para obter a dureza desejada. Após essa fase o aço pode ser submetido a outras fases, dependendo das necessidades.

. Já o revenido é um processo realizado no aço após a têmpera, onde o mesmo é aquecido até temperaturas abaixo da faixa de transformação A1 e resfriado a taxas baixas, objetivando aumentar a ductibilidade e tenacidade. O revenido propicia obter valores específicos de propriedades mecânicas e o alívio de tensões, assegurando estabilidade dimensional. (Américo, 2007).

3.6 Ferramenta PCBN

As ferramentas de PCBN (Nitreto de Boro Cúbico Policristalino) são constituídas por compósitos de grão de CBN (Nitreto Cúbico de Boro) e uma matriz ligante (SOUZA,2013). Depois do diamante é o material mais duro, totalmente artificial e sintetizado, sendo classificada pelo seu teor de CBN. Foi introduzido como um material de ferramenta de corte na década de 1980, aplicadas nas usinagens de aços endurecidos, ferros fundidos e superliga resistente ao calor (HRSA), materiais caracterizados como de difícil usinagem (SANDVIK,2012). As ferramentas de PCBN se caracterizam por dureza, estabilidade termoquímica e inertes a materiais que contem carbono, resistência abrasiva e baixo coeficiente de expansão térmica (SOUZA, 2013).

Apesar da consolidação do beneficiamento de ferramentas PCBN, segundo Pu et. al. (2013), ainda é limitado o conhecimento da influência de CBN nas ferramentas de PCBN, a maioria dos pesquisadores recomendam ferramentas com baixos teores de CBN para torneamento de aços endurecidos devido a sua resistência química, porém pode não ser adequado para fresagens difíceis como a HSM, especialmente para os aços ferramentas para trabalho a frio com dureza > 60 HRC .

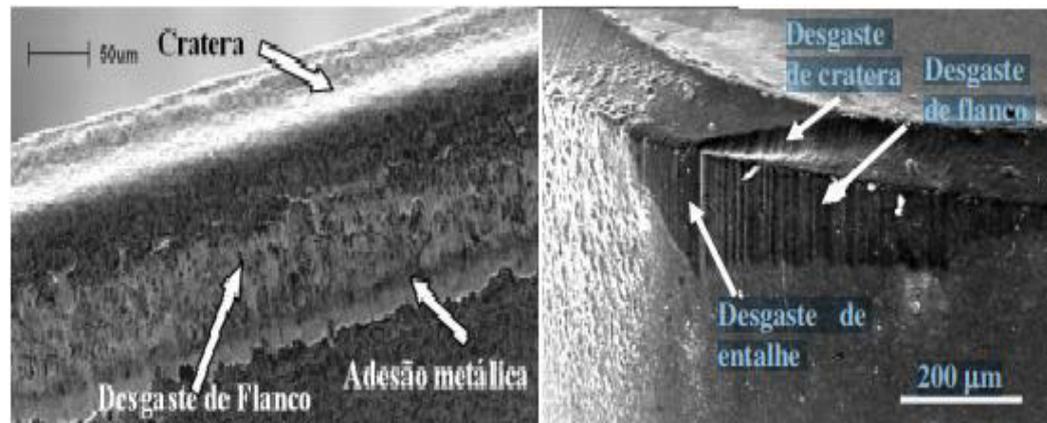
De acordo com Saketi et. al. (2015) classes de CBN com elevado teor oferecem resistência ao desgaste superior na fresagem de aços ferramentas, devido a elevada resistência do aço endurecido e a fragilidade da ferramenta de PCBN, se faz necessário a utilização de aresta de corte chanfrada, o que leva a um ângulo de inclinação negativo grande. Isso aumenta a resistência da ferramenta e reduz a possibilidade de fraturas, no entanto conduz a deformação plástica mais grave e temperaturas de corte mais elevadas, aumentando a tendência ao desgaste do inserto.

3.6.1 Mecanismo de desgaste em ferramentas de PCBN

Segundo Souza (2013) a principal vantagem das ferramentas de corte de CBN é apresentar estabilidade em altas temperaturas durante a usinagem em contato com materiais ferrosos, em manter a estabilidade sem refrigeração, por longos períodos em temperaturas acima de 1000 ° C, ainda que, os mecanismos mais comumente utilizados para explicar o desgaste de ferramentas de PCBN são abrasão, adesão, difusão, desgaste químico e adesão seguida de arrancamento e arrastamento sendo os mais estudados os desgastes de flanco e de cratera.

Já para Katuku et al (2005) os tipos de desgastes e avarias observados ao utilizar ferramenta de corte seco CB100 em experimentos de torneamento de acabamento a seco de peças ASTM GRAU 2 ADI foram desgaste de flanco, desgaste de cratera e deformação plástica. Na figura 02 é possível observar alguns tipos de desgaste mencionados.

Figura 02: Exemplos de desgaste de Cratera, de Flanco, adesão metálica e entalhe



Fonte: adaptado Souza(2013)

3.7 Rugosidade

Segundo Espanhol (2008) a rugosidade de uma superfície é determinada pelas irregularidades finas ou erros micrométricos da ação intrínseca do processo de corte. Zanuto et al (2013) afirma que quando examinado em termos de linhas superficiais o fresamento de faceamento revela marcas características de semicírculos sobrepostos resultantes do trajeto da ferramenta e da estratégia de corte utilizada.

Verificou-se também a influência do desgaste da ferramenta de corte na rugosidade da peça e nos níveis dos sinais de vibração no processo de usinagem, pretendendo monitorar a vida da ferramenta de corte através da relação entre o desgaste da ferramenta e o aumento dos níveis dos sinais de vibração (PEREIRA et al, 2004)

Por esses motivos optou-se por realizar a análise da rugosidade no processo de investigação do desgaste dos insertos e foi utilizada a rugosidade média (Ra) definida como a média aritmética dos valores absolutos do comprimento da amostragem, como visto na figura 03.

Figura 03: Rugosidade Média (Ra) NBR ISO 42:87:2002



Fonte: Zanuto et al (2013)

Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento da amostra de medição representada matematicamente (DE SÁ, 2010)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

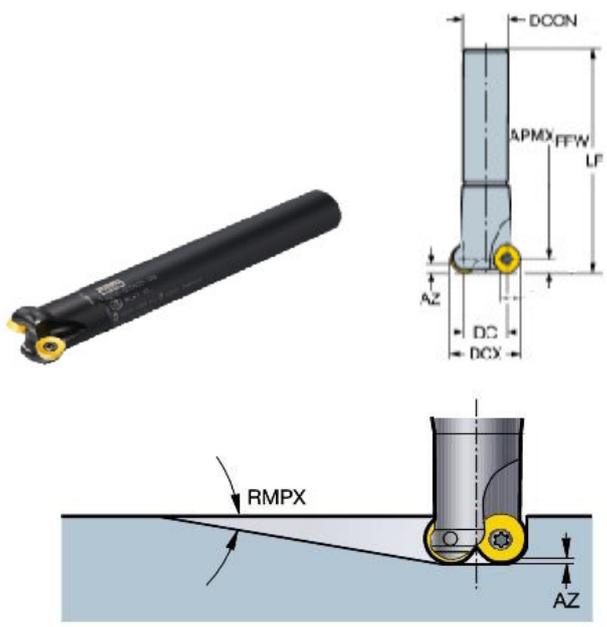
4.1 Materiais

Para a realização do processo de usinagem de fresamento, da aquisição dos dados sendo temperatura e rugosidade, do tratamento térmico dos corpos de prova e das imagens adquiridas por meio de Microscópio digital e Microscópio de Varredura Eletrônica foram utilizados equipamentos, instrumentos e metodologias que serão descritas a seguir.

4.1.1 Ferramentas

Para o fresamento foi utilizado como suporte uma fresa com inserto redondo CoroMill® 200 da Sandvik Coromant, que possibilita em função de sua geometria diversas operações dentre elas as operações de faceamento, perfilamento e acabamento. Disponível com passo largo(-L), fino(-M) e extra-fino (-H) para performance em diferentes condições, no processo foi utilizado de passo fino indicado para fresamento geral e produção mista, para máquinas pequenas à médias. Possui ângulo máximo para fresamento em rampa de 13° permitindo ainda fresamento em mergulho e helicoidal. A tabela 02 mostra os dados pertinentes a nossa necessidade na utilização deste suporte.

Tabela 02 Dados do suporte da ferramenta

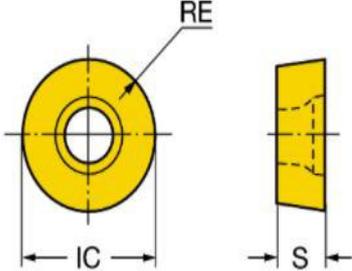
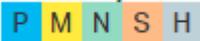
	
FUNÇÃO	Fresa de facear CoroMill® 200

CÓDIGO	R200-020A25-12M	
INFORMAÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Profundidade de corte máxima	APMXFFW	6 mm
Diâmetro máximo de corte	DCX	32 mm
Diâmetro de corte	DC	20 mm
Contagem de itens de corte	CICT	2
Ângulo máximo de rampa	RMPX	13 graus
Profundidade máxima de corte	APMXEFW	9 mm
Profundidade máxima de mergulho	AZ	3,7mm
Diâmetro da conexão	DCON	20 mm
Velocidade máxima de rotação	RPMX	31.100 l/min
Comprimento funciona	LF	190 mm

Fonte: adaptada do site Sandvik, 2021

Junto ao suporte foi utilizado dois tipos diferentes de insertos, o primeiro de metal duro (tabela 03) aplicado na usinagem do corpo de prova no estado normal do aço VC 131 ou seja recozido sem tratamento e num segundo momento no corpo de prova no estado temperado e revenido.

Tabela 03: Dados inserto Metal Duro

					
FUNÇÃO	Inserto CoroMill® 200 para fresamento				
CÓDIGO	RCKT 12 04 M0-PH 1130				
INFORMAÇÃO	SÍMBOLO	VALOR			
Classificação de materiais nível 1		-			
Espessura da pastilha	S	4,762 mm			

Diâmetro do círculo inscrito	IC	12 mm
Raio do canto	RE	6 mm

Valores iniciais:

	fz 0.35 mm(0.1-0.42) vc 180 m/min(255-160)		fz 0.35 mm(0.1-0.42) vc 160 m/min(240-145)
	fz 0.35 mm(0.1-0.42) vc 27 m/min(38-24)		fz 0.35 mm(0.1-0.42) vc 24 m/min(39-21)

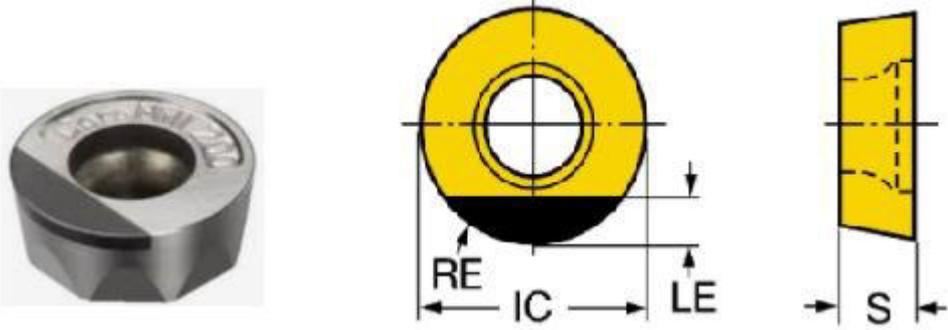
Fonte: adaptada do site Sandvik, 2021

Com o segundo inserto é de PCBN (tabela 04) que são ferramentas constituídas por 50% de compósitos de grãos de nitreto de boro cúbico neste caso classificada como classe de baixo teor de CBN (40- 70%) e uma provável matriz ligante a base de cerâmica com Carboneto de Titânio (TiC) e Nitreto de Titânio (TiN). A utilização de ligante de cerâmica propicia maior resistência de união entre os grãos de CBN do que a permite por ligantes metálicos.

Esta união com ligantes de cerâmica tem como resultado um aumento da dureza da ferramenta e quando utilizados tamanho de grãos do ligante cerâmico com dimensões micrométricas notou-se uma maior dureza ainda. Sendo assim é essencial para o processo de usinagem a composição ligante e CBN utilizadas em insertos de PCBN.

A escolha dessa classe foi em função do corte da ferramenta ser do tipo interrompido, já que a classe de alto teor de CBN (80-95%) com um ligante metálico (Co, W, Al) torna a ferramenta menos tenaz (SOUZA, 2013). Foi utilizado no processo de usinagem por acabamento, que se caracteriza por ter uma velocidade de corte maior, um avanço mais baixo e profundidade de corte menor, do corpo de prova no estado recozido e após o tratamento térmico de tempera e revenido com dureza de 55 HRC, sem fluido de corte.

Tabela 04: Dados inserto PCBN

		
FUNÇÃO	Inserto CoroMill® 200 para fresamento	
CÓDIGO	RCHT 12 04 M0 CB50	
INFORMAÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Classificação de materiais nível 1	K H	-
Espessura da pastilha	S	4,762 mm
Diâmetro do círculo inscrito	IC	12 mm
Raio do canto	RE	6 mm
Valores iniciais:		
	fz 0.1 mm(0.08-0.15) vc 910 m/min(970-780)	
		fz 0.1 mm(0.08-0.15) vc 145 m/min(155-125)

Fonte: adaptada do site Sandvik, 2021

4.2.2 Equipamento

O centro de usinagem utilizado foi da marca Diplomat modelo SKYBULL 600 (Figura 04) que possui como principais características construtivas uma unidade de comando, guias lineares, limpeza do cone da árvore automática, magazine com 20 ferramentas e lógica bidirecional para troca de ferramentas.

Figura 04: Centro de usinagem SKYBULL



Fonte: GOACO, 2022

Na tabela 05 contém as principais características técnicas do centro de usinagem que teve certa influência na escolha da geometria do corpo de prova, nos parâmetros de corte utilizados, na construção da rotina de usinagem projetada, na escolha da ferramenta utilizada, no tipo de fixação do corpo de prova e de não utilização da refrigeração de corte.

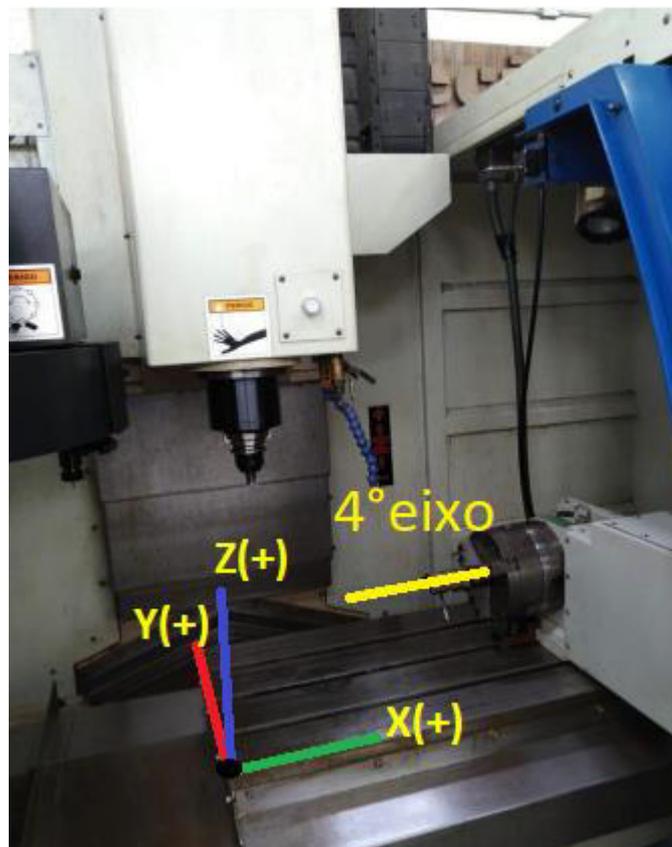
Tabela 05: Características técnicas SKYBULL600

Características	Valor
Tamanho da mesa	420 X 800 mm
Curso longitudinal(x)	600 mm
Curso transversal (y)	400 mm
Curso vertical (z)	480 mm
Peso admissível da mesa	400 KG
Avanço rápido	24.000 mm/min
Faixa velocidade	80 – 8000 rpm
Ferramentas no magazine	20
Comando	Fanuc

Fonte: GOACO, 2022

O equipamento possui ainda um 4º eixo do tipo divisor(figura 05) que foi anexado a mesa do centro de usinagem, porém por ter um pós-processador instalado na máquina é possível realizar o movimento dos eixos na forma simultânea ou posicionado (sendo 3 +1 eixos), essa última forma se caracteriza por ter o movimento simultâneo somente nos eixos “X, “Y e “Z” sendo o 4º eixo posicionado durante o processo. Em função da característica geométrica do material optou-se em não utilizar o 4º eixo, outra variável foi garantir uma maior estabilidade e rigidez com a fixação do corpo de prova na morsa presa na mesa optando-se pelo plano de trabalho G17 em 3 eixos.

Figura 05: Posicionamento dos eixos.



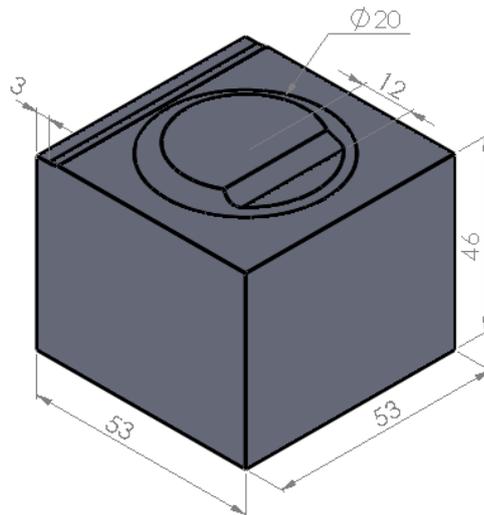
Fonte: do autor

4.1.3 Corpo de prova

O material do corpo de prova foi adquirido no aço VC131 estado recozido e normalizado, cortado na serra em bloco nas dimensões de 55x55x52mm com dureza de 264HB (27HRC). Primeiramente foi usinado e esquadrejado ficando com dimensões de 53x53x46mm

geometria apropriada para usinagem de perfil no centro de usinagem. A fixação do corpo de prova foi feita em uma morsa retificada presa na mesa do centro de usinagem, utilizando junto um calço retificado que serviu como apoio e ajuste da altura em relação ao eixo “Z”, a posição do corpo de prova no mordente da morsa em relação ao eixo “X” se deu a partir de um batente fixado na lateral esquerda morsa (vista frontal), utilizando como referência este batente e de outro calço retificado realizou-se o posicionamento e aperto do corpo de prova garantindo assim o posicionamento em relação ao zero peça localizado nesse caso no centro do bloco. Depois da usinagem conforme estratégias planejadas o corpo de prova obteve a geometria representada na figura 06.

Figura 06: Geometria do corpo de prova



Fonte: do autor

4.2 Metodologia adotada

A pesquisa consiste na análise do desgaste do inserto na usinagem de corpos de prova em aço VC131 no estado recozido e normalizado e também no estado temperado e revenido. No primeiro momento foi realizado a usinagem com aço no estado recozido utilizando inserto de Metal Duro e de PCBN. No segundo momento foi realizado o mesmo processo no aço temperado utilizando também inserto de Metal Duro e de PCBN, o procedimento de tempera foi realizado nos corpos de prova após a usinagem no estado recozido sem alívio de tensões.

Os dados coletados foram da temperatura na área usinada durante o processo e da rugosidade da superfície usinada após cada processo. O corpo de prova foi projetado com quatro estratégias de usinagem sendo a mesma profundidade de corte (ap) de 0,5mm e o mesmo avanço

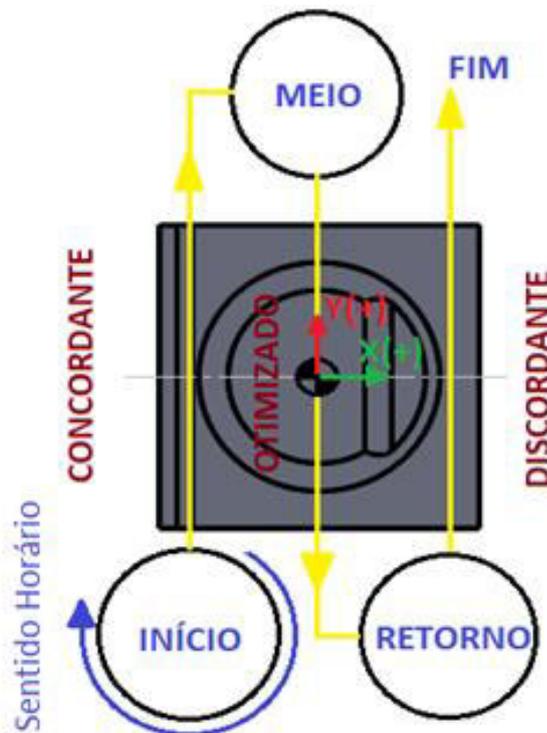
(f) de 0,1 mm/rot para todas, porém com diferentes penetrações de trabalho (ae) e diferentes movimentos de avanço.

Para a aquisição dos dados foi estipulado locais para aquisição da temperatura e posições para a leitura da rugosidade. Foi utilizado também um microscópio digital para a identificação do desgaste dos insertos e posteriormente o Microscópio Eletrônico de Varredura. O equipamento para usinagem utilizado foi um centro de usinagem 3 eixos e a ferramenta uma fresa de faceamento com dois inserto redondo e sem lubrificação. Ainda foi realizado o ensaio da dureza do material no estado recozido e temperado. Os detalhes e especificações de cada procedimento serão descrito a seguir.

4.3 Elaboração das estratégias de usinagem

A execução da usinagem foi planejada em quatro estratégias, a primeira denominada “P1” foi o processo faceamento do corpo de prova que começou com uma interpolação linear sendo o avanço concordante, retornando com avanço otimizado e terminado com avanço discordante conforme figura 07 e com um passe de profundidade de 0,5 mm .

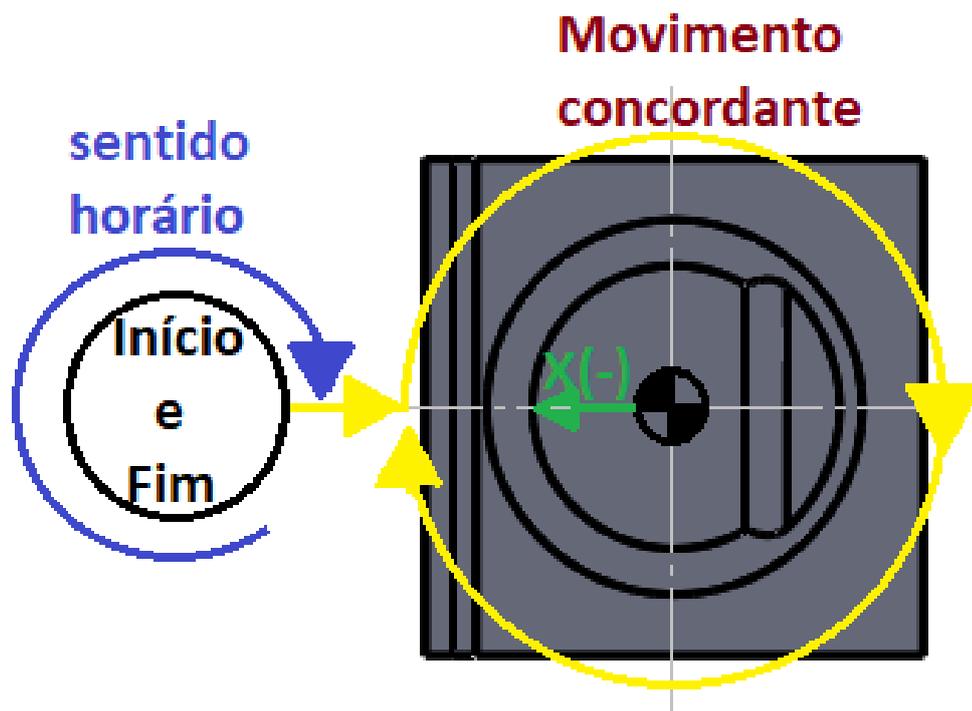
Figura 07: Estratégia de Usinagem “P1”



Fonte: do autor

A segunda estratégia foi denominada de “P2”, sendo uma interpolação circular com movimento concordante, entrada da ferramenta no meio do corpo de prova em relação ao eixo “Y”, no lado negativo do eixo “X” (figura 08) e profundidade fora da peça de 0,5 mm com 5 passes totalizando 2,5 mm.

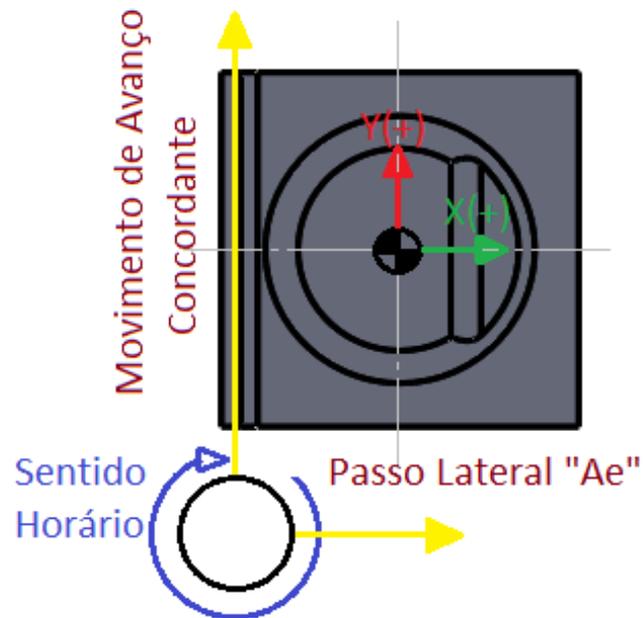
Figura 08: Estratégia de usinagem “P2”



Fonte: do autor

A terceira estratégia foi uma interpolação linear com avanço no eixo “Y” com movimento concordante sendo o retorno em avanço rápido (G00), penetração de trabalho (ae) de 0,2 mm no eixo “X” com 15 passes totalizando 3 mm (figura 09) e uma profundidade de corte de 0,5 mm.

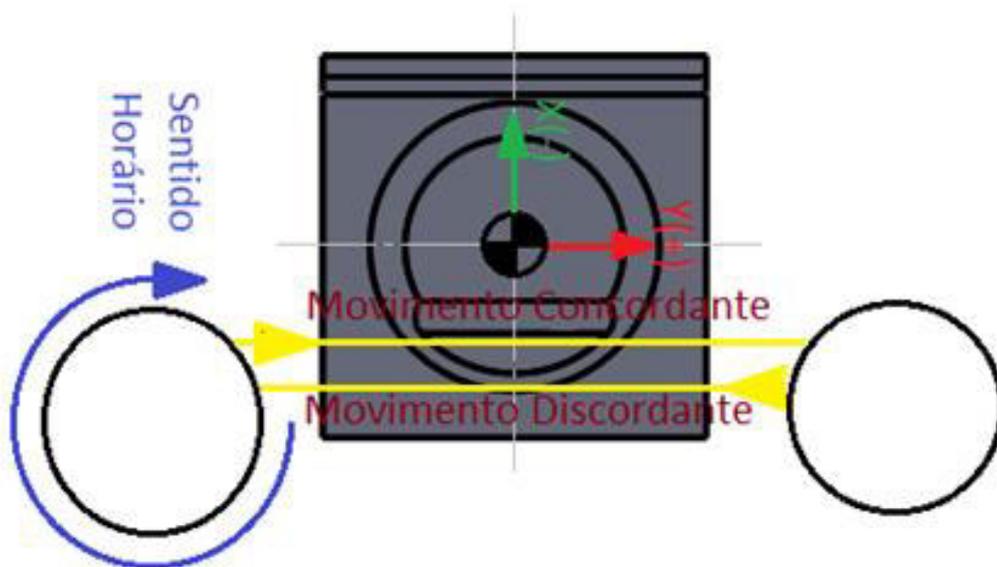
Figura 09: Estratégia de usinagem “P3”



Fonte: do autor

A quarta e última estratégia foi uma interpolação linear com avanço no eixo “Y” com movimento de corte inicial discordante profundidade no final e retorno com movimento de corte concordante, sem passo lateral, com profundidade de corte de 0,5mm sempre fora da peça sendo 4 passes totalizando 2 mm conforme figura 10.

Figura 10: Estratégia de usinagem “P4”



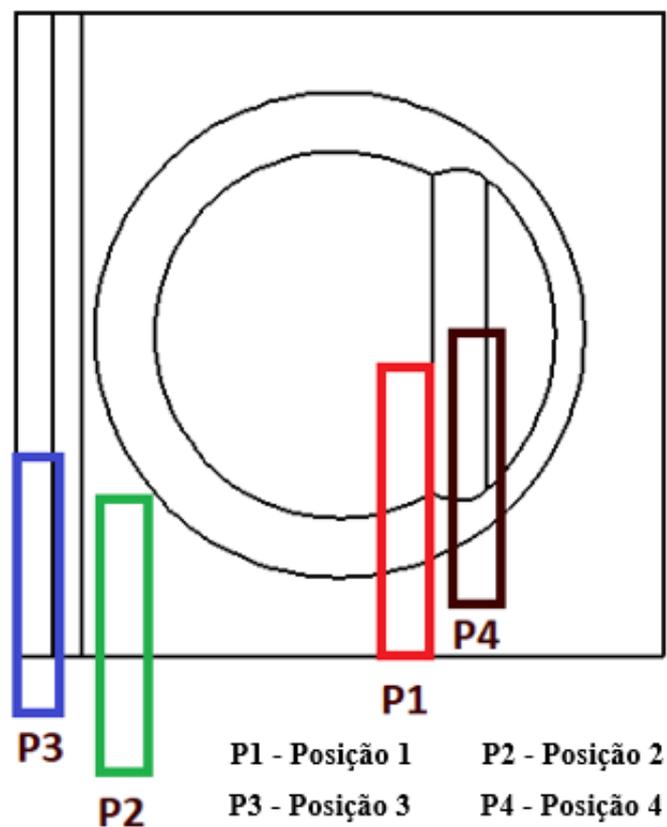
Fonte: do autor

4.4 Metodologia de aquisição dos dados

4.4.1 Leitura da rugosidade

Leitura da rugosidade foi realizada nas posições referentes a cada estratégia nos pontos representados conforme figura 11. Para realizar as leituras utilizou-se um Rugosímetro da marca Mitutoyo modelo sj-201, e as medições foram realizadas diretamente no centro de usinagem, o aparelho foi fixado em uma base magnética que foi posicionada em cada ponto e ajustada de acordo com cada posição de leitura conforme figura 12.

Figura 11: Posições de leitura da rugosidade



Fonte: do autor

Figura 12: Utilização Rugosímetro



Fonte: do autor

4.4.2 Leitura das temperaturas na usinagem

A aquisição das leituras de temperatura foi realizada utilizando um Termômetro Digital Infravermelho TD-979 portátil da marca ICEL que possui uma escala de -50°C a 1000°C com resolução de 1°C e $0,1^{\circ}\text{C}$ e exatidão na faixa de -20°C a 200°C de $\pm 1,5\% + 2^{\circ}\text{C}$ considerando uma emissividade de 0,95, porém como as superfícies metálicas polidas e brilhantes apresentam baixa emissividade utilizou-se o valor de 0,81 para realizar as leituras conforme orientação do fabricante. A metodologia utilizada para a leitura das temperaturas está representada na tabela 06 e os pontos de aquisição no momento da usinagem representados na figura 13. Ressalta-se ainda que as medições foram realizadas de forma manual sem auxílio de suporte de fixação, devido ao movimento de avanço da mesa em relação a ferramenta, salienta-se ainda que a distância utilizada entre o termômetro e a área medida aproximou-se do fator de distância D:S (D= distância , S= diâmetro da área) de 50:1 (figura 14) conforme fabricante, ou seja, com

aproximadamente 500 milímetros de distância o diâmetro da área medida aproximada foi de 10 milímetros .

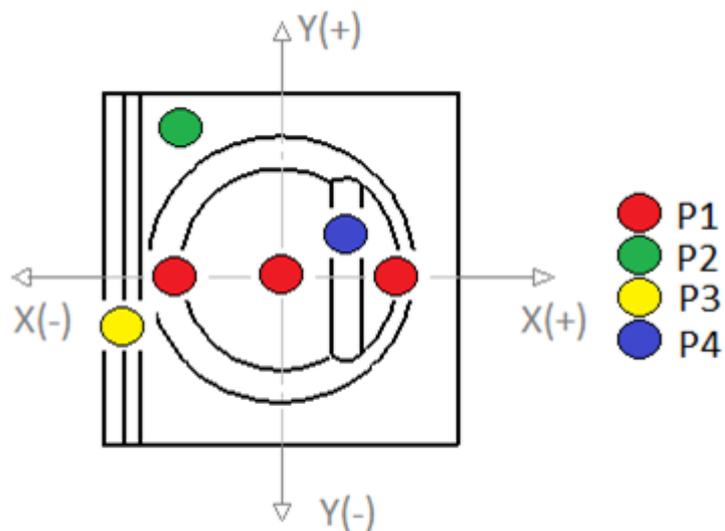
Tabela 06: Momento de leitura das temperaturas

ESTRATÉGIAS	Nº DE PASSES	1ª LEITURA	2ª LEITURA	3ª LEITURA
P1	1	AVANÇO CONCORD.	AVANÇO OTIMIZADO	AVANÇO DISCORD.
P2	5	3º PASSE	4º PASSE	5º PASSE
P3	15	5º PASSE	10º PASSE	15º PASSE
P4	4	1º AVANÇO DISCORD.	2º AVANÇO CONCORD.	4º AVANÇO CONCORD.

Fonte: do autor

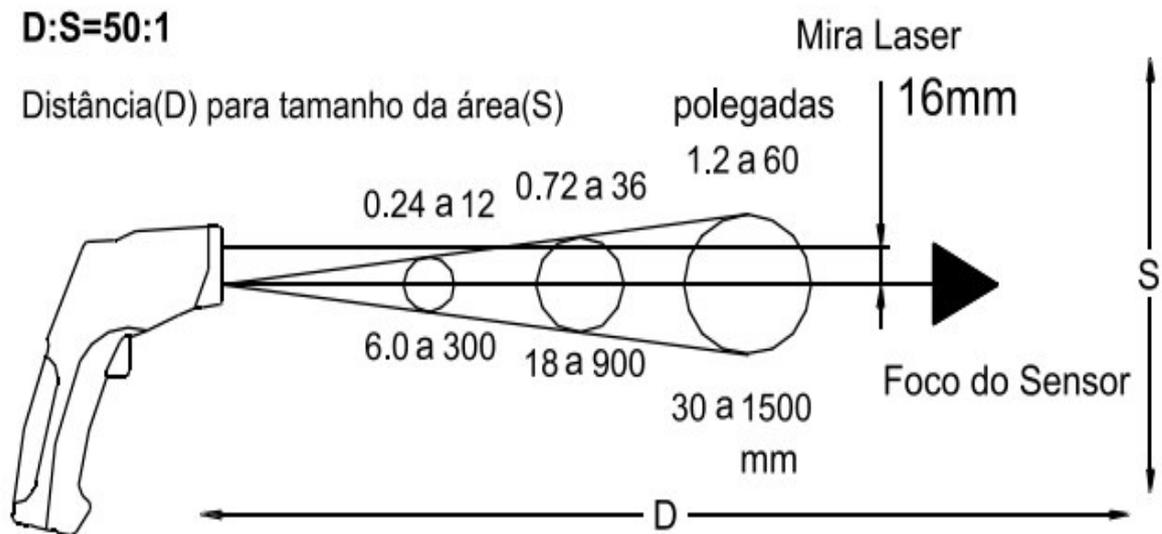
Foi considerado o maior valor do display digital no ponto determinado conforme demonstrado na figura 11. Importa pontuar que foi considerada a relação do sentido do movimento de avanço com a posição da aresta de corte do inserto e a área de corte efetiva no material, de forma que o laser incidisse 16mm acima do ponto de usinagem (conforme orientação do manual do termômetro).

Figura 13: Pontos de leitura da temperatura



Fonte: do autor

Figura 14: Termômetro Digital Infravermelho D:S



Fonte: Manual ICEL

4.4.3 Análise do desgaste da ferramenta (MEV)

Microscopia Eletrônica de Varredura As imagens de MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) foram obtidas junto ao CEME-Sul da Universidade Federal do Rio Grande, no equipamento marca Jeol, modelo JSM-6610LV. A tensão aplicada foi de 15 kV.

4.4.4 Analise do desgaste por Imagem Microscopia Digital (IMD)

As imagens foram obtidas com auxílio de um Microscópio Digital Monocular da marca Knup modelo 8012 com câmera de 2mp, zoom 1000x, adaptada em uma base fixada a um graminho não escalonado.

4.5 Tratamento Térmico

Para a realização do processo de tratamento térmico foi seguida as especificações técnicas do fabricante que consistiu em um pré-aquecimento, processo de tempera, resfriamento no óleo seguido de um ventilador, em seguida revenimento em duas etapas

Para executar o processo de têmpera foi utilizado um Forno Mufla da marca Quimis e um Forno Jung modelo 7012 para realizar o revenimento (Figura 15).

Figura 15: a) Forno para Têmpera; b) Forno para Revenimento;



Fonte: do autor

Primeiramente foi feito um pré-aquecimento dos corpos de prova no forno da têmpera a uma temperatura de 500°C e mantido até chegar a temperatura de 950°C , manteve-se durante uma hora (Figura 16).

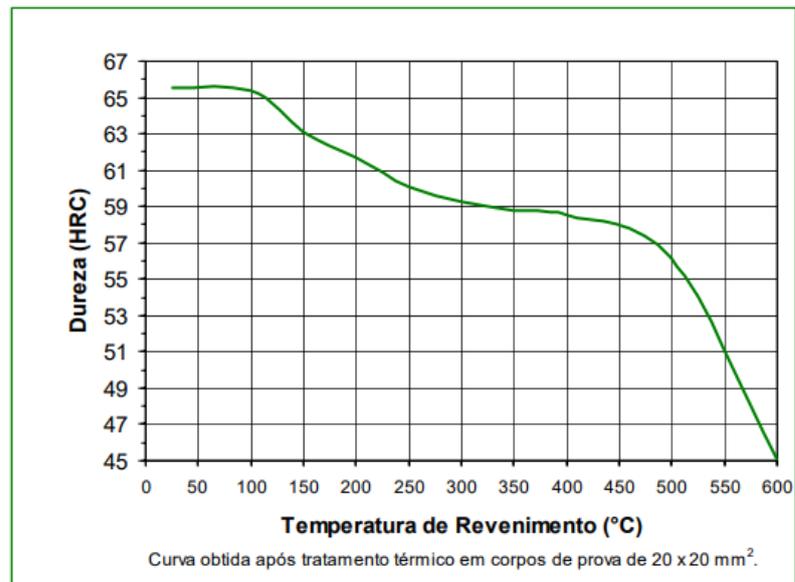
Figura 16: a) Forno de têmpera 950°C ; b) Forno de revenimento 280°C ;



Fonte: do autor

Ao término de 1 hora foi retirado um corpo de prova de cada vez do forno e mergulhado em óleo apropriado com agitação até uma temperatura média de 150°C depois foi retirado e resfriado com ventilador por dois minutos. Em seguida foram colocados no forno para realizar o processo de revenimento a uma temperatura de 280°C conforme tabela 07 e manteve-se lá por duas (2) horas.

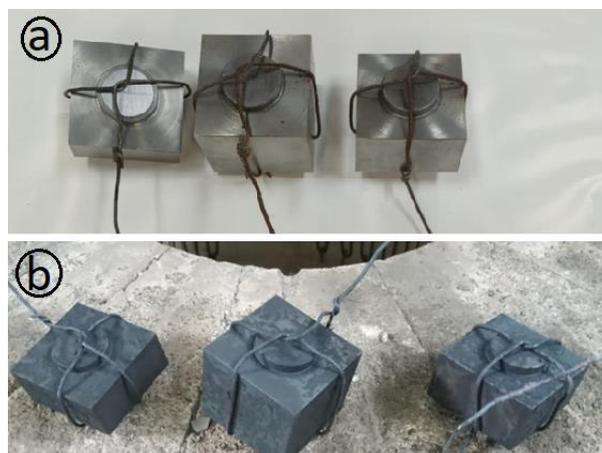
Tabela 07: Escolha da temperatura de revenimento



Fonte: Villares Metals

Após esse tempo os corpos de prova foram retirados do forno e deixados resfriar lentamente até a temperatura ambiente (Figura 17). Em seguida repetiu-se o processo de revenimento e resfriamento a temperatura ambiente.

Figura 17:a) Corpos de prova recozido; b) Corpos de prova 1ª revenida



Fonte: do autor

5. RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 Tabelas com as leituras das temperaturas e rugosidades.

Foram feitas três leituras de temperatura durante a usinagem em cada um dos quatro pontos do processo, pontos estes que representam as diferentes estratégias executadas, na tabela 08 é representado a terminologia adotada. Após o término da usinagem completa, ou seja, das quatro estratégias foi realizado a aquisição de três leituras em cada ponto das rugosidades. O objetivo de realizar três leituras repetidas foi de excluir o valor mais discrepante em relação aos outros dois, tanto para valores mais altos como para valores mais baixos. As tabelas 09 e 10 mostram os valores adquiridos com os respectivos valores excluídos em verde. Após a execução do perfil final se fez necessário a usinagem de faceamento, que consiste no rebaixo do material em 3mm, possibilitando assim o reinício da próxima usinagem de perfil, este processo foi executado com a mesma ferramenta analisada, portanto foi analisada da mesma forma a temperatura (TF) durante o faceamento e após da rugosidade da superfície (RF) resultante do processo.

Tabela 08: Sigla/Significados

SIGLA	SIGNIFICADO	SIGLA	SIGNIFICADO
TP1	TEMPERATURA NA POSIÇÃO 1	TF	TEMPERATURA NO FACEAMENTO
TP2	TEMPERATURA NA POSIÇÃO 2	CP	CORPO DE PROVA
TP3	TEMPERATURA NA POSIÇÃO 3	U1	USINAGEM 1
TP4	TEMPERATURA NA POSIÇÃO 4	U2	USINAGEM 2
RP1	RUGOSIDADE NA POSIÇÃO 1	U3	USINAGEM 3
RP2	RUGOSIDADE NA POSIÇÃO 2	U4	USINAGEM 4
RP3	RUGOSIDADE NA POSIÇÃO 3	U5	USINAGEM 5
RP4	RUGOSIDADE NA POSIÇÃO 4	U6	USINAGEM 6
RF	RUGOSIDADE NO FACEAMENTO		LEITURAS EXCLUÍDAS

Fonte: do autor

5.1.1 Processo de usinagem com inserto de PCBN do CP1 recozido

Tabela 09: Valores das Temperaturas e Rugosidades com PCBN no CP 1 recozido

LEITURA DA RUGOSIDADE E TEMPERATURA NA USINAGEM DO CORPO DE PROVA 1 RECOZIDO, COM INSERTO DE PCBN									
RF (μm)	TF (°C)	TP1 (°C)	TP2 (°C)	TP3 (°C)	TP4 (°C)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP1 U1 PCBN									
PERFIL U1		25	43	32	51	0,16	0,61	0,17	0,42
						0,14	0,66	0,15	0,36
						0,16	0,17	0,20	0,37
CP1 F1 PCBN									
0,13	61	FACEAMENTO F1							
0,18	62								
0,16	52								
CP1 U2 PCBN									
PERFIL U2		61	69	45	36	0,16	0,66	0,19	0,18
		62	76	36	38	0,16	0,84	0,11	0,17
		52	86	33	36	0,16	0,46	0,18	0,37
CP1 F2 PCBN									
0,46	43	FACEAMENTO F2							
0,65	68								
0,48	68								
CP1 U3 PCBN									
PERFIL U3		46	88	42	42	1,40	1,06	0,21	0,13
		55	90	37	43	1,60	0,85	0,10	0,13
		42	103	35	42	1,06	0,42	0,12	0,16
CP1 F3 PCBN									
1,98	59	FACEAMENTO F3							
2,03	63								
1,04	98								

Fonte: do autor

Tabela 10: Valores das Temperaturas e Rugosidades com PCBN no CP2

LEITURA DA RUGOSIDADE E TEMPERATURA NA USINAGEM DO CORPO DE PROVA 2 REVENIDO, COM INSERTO DE PCBN									
RF (μm)	TF (°C)	TP1 (°C)	TP2 (°C)	TP3 (°C)	TP4 (°C)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP2 U4 PCBN									
PERFIL U4		75	85	34	36	0,74	0,24	1,20	0,38
		68	86	33	36	0,27	0,34	0,22	0,15
		64	88	33	43	0,65	0,24	0,22	0,12
CP2 F4 PCBN									
	62	FACEAMENTO F4							
	82								
	84								

CP2 U5 PCBN								
PERFIL U5	86	86	33	38	1,92	2,67	0,94	0,98
	82	85	31	43	1,37	1,97	1,43	0,71
	84	85	32	46	1,79	2,85	0,90	0,95
CP2 F5 PCBN								
0,87	64	FACEAMENTO F5						
1,15	76							
1,11	94							
CP2 U6 PCBN								
PERFIL U6	81	101	39	35	0,30	0,25	0,11	0,13
	84	112	35	39	0,40	0,25	0,13	0,57
	81	117	36	46	0,37	0,24	0,13	0,22
CP2 F6 PCBN								
-	-	FACEAMENTO NÃO FOI REALIZADO MANTEVESSE A GEOMETRIA PARA O TRATAMENTO TÉRMICO						
-	-							
-	-							

Fonte: do autor

A tabela 11 mostra as leituras resultantes do cálculo da média aritmética dos dois valores restantes tanto para temperatura como para rugosidade, com esses valores foram gerados os gráficos que mostram o comportamento da temperatura e da rugosidade no decorrer das seis usinagens.

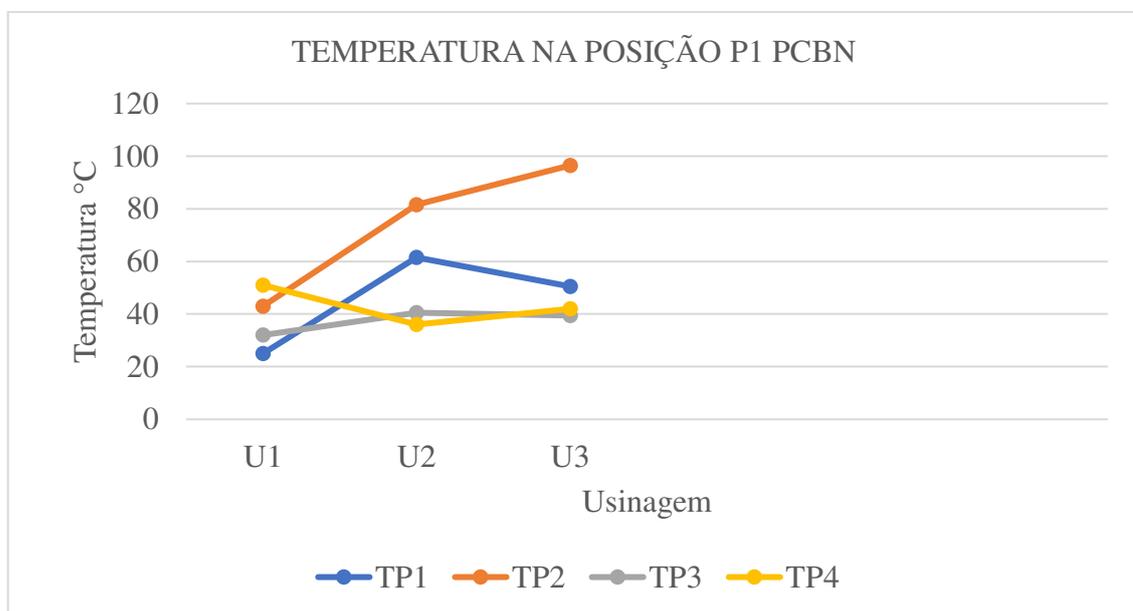
Tabela 11: Leituras das temperaturas e rugosidades finais

LEITURA DA TEMPERATURA E RUGOSIDADE MÉDIA NA USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA 1 RECOZIDO COM INSERTO DE PCBN										
USINAGEM	RF (μm)	TF ($^{\circ}\text{C}$)	TP1 ($^{\circ}\text{C}$)	TP2 ($^{\circ}\text{C}$)	TP3 ($^{\circ}\text{C}$)	TP4 ($^{\circ}\text{C}$)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP1 PCBN										
U1	0,170	25,0	25,0	43,0	32,0	51,0	0,160	0,635	0,185	0,365
U2	0,470	68,0	61,5	81,5	40,5	36,0	0,160	0,750	0,185	0,175
U3	2,005	80,5	50,5	96,5	39,5	42,0	1,500	0,955	0,165	0,130
CP2 PCBN										
U4	0,74	82,0	71,5	87,0	33,5	39,5	0,695	0,240	0,220	0,135
U5	1,13	85,0	85,0	85,0	32,5	44,5	1,855	2,760	0,920	0,965
U6	-	-	81,0	114,5	37,5	42,5	0,385	0,250	0,130	0,395

Fonte: do autor

Na figura 18 é possível observar diferentes comportamentos da temperatura em cada estratégia executada, acredita-se que esse fator deve-se as diferentes cargas aplicadas em cada uma das estratégias, ou seja a pesar das rotinas possuírem a mesma profundidade de corte e o mesmo avanço tinham porém penetrações de trabalho diferentes, observando o comportamento da estratégia TP2 nota-se o real acréscimo em comparação a estratégia TP3 onde o passe lateral é de apenas 0,2mm.

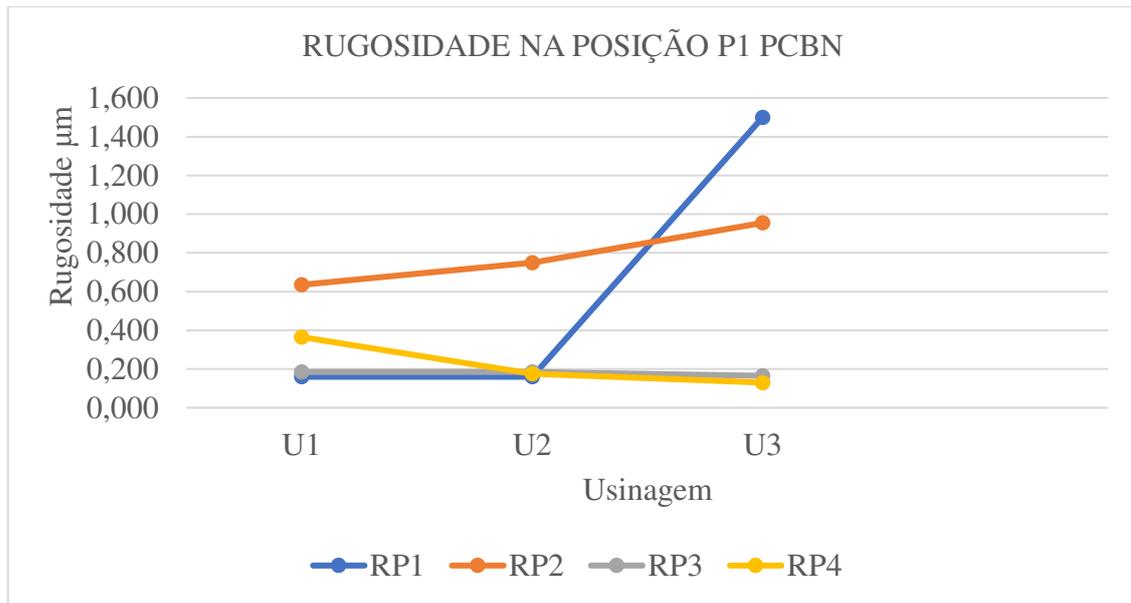
Figura 18: Temperatura nas posições: CP1 Recozido com PCBN



Fonte: do autor

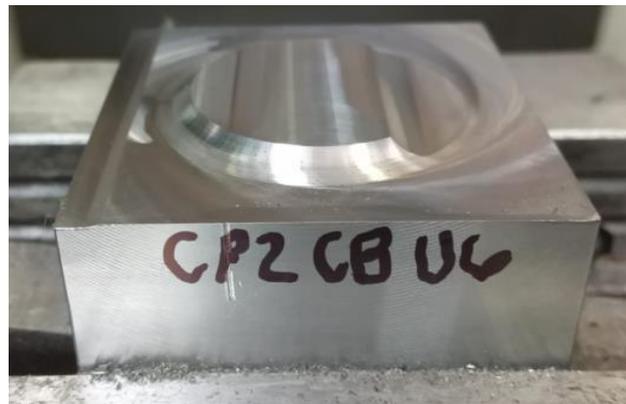
Na figura 19 aparece também uma evolução da linha RP2 reforçando a hipótese anterior, porém o comportamento da linha RP1 a partir da U2 contraria o comportamento da TP1 na figura 18 acredita-se que essa discrepância se deva ao fato de que no ponto analisado a rugosidade conforme a figura 08 (dos pontos de aquisição) ter um movimento de avanço otimizado que se caracteriza por ter toda a área de corte em contato com a peça e também do movimento seguinte que é discordante ter um trajeto sobreposto, essas características combinadas com as folgas nas guias e do cabeçote podem gerar um pequeno sobre metal que é retirado no 3º passe conforme dito.

Figura 19: Rugosidade nas posições: CP1 Recozido com PCBN



Fonte: do autor

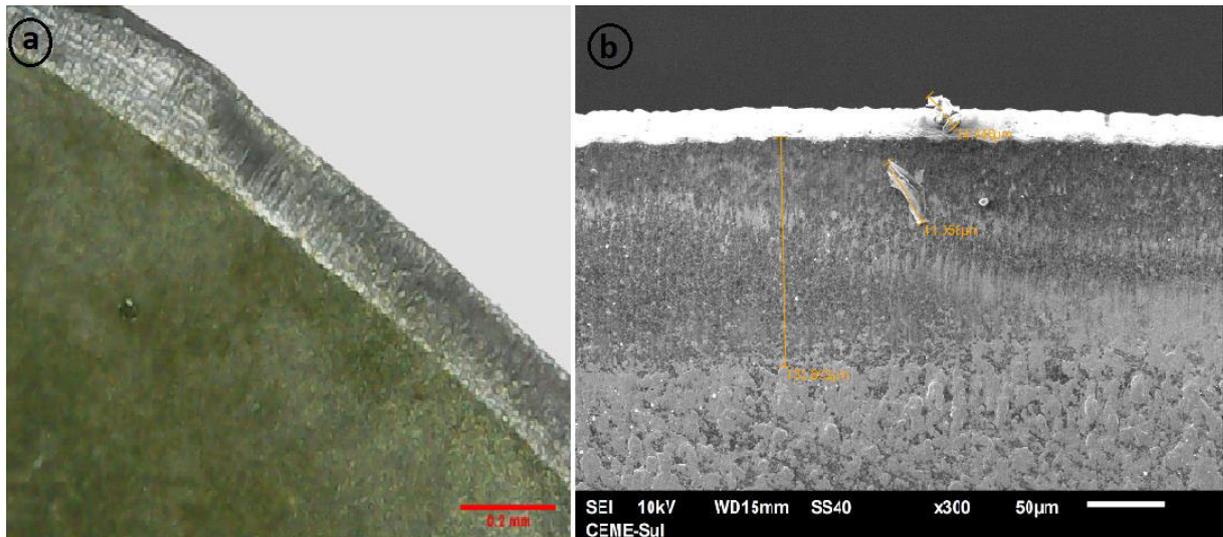
Figura 20: Usinagem 06 com PCBN no corpo de prova 2



Fonte: do autor

Na figura 21 observa-se um desgaste de flanco com uma deformação plástica da superfície modificando o ângulo de negativo para positivo e ainda com adesão de material. Ventila-se a possibilidade do tipo de desgaste onde nota-se um arredondamento da aresta de corte, ser o responsável pela melhora da rugosidade porém com uma possível perda dimensional, ou seja mesmo com o desgaste de flanco da aresta de corte e considerando a característica da geometria do inserto (chanfrada) possibilitaria o corte do material porém com perda na profundidade real de corte. Outro fator que foi identificado mas não mensurado porém corrobora com essa hipótese, foi a excessiva vibração da ferramenta em relação ao material na U6.

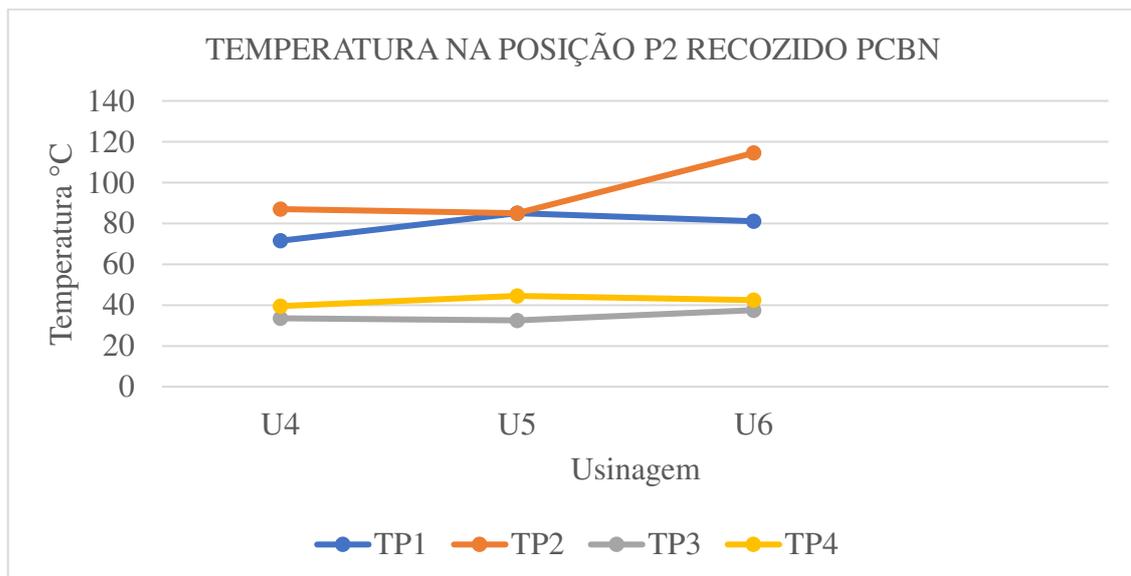
Figura 21: Desgaste inserto PCBN no CP2 recozido, a) IMD ampliação 130x; b) MEV x300



Fonte: do autor

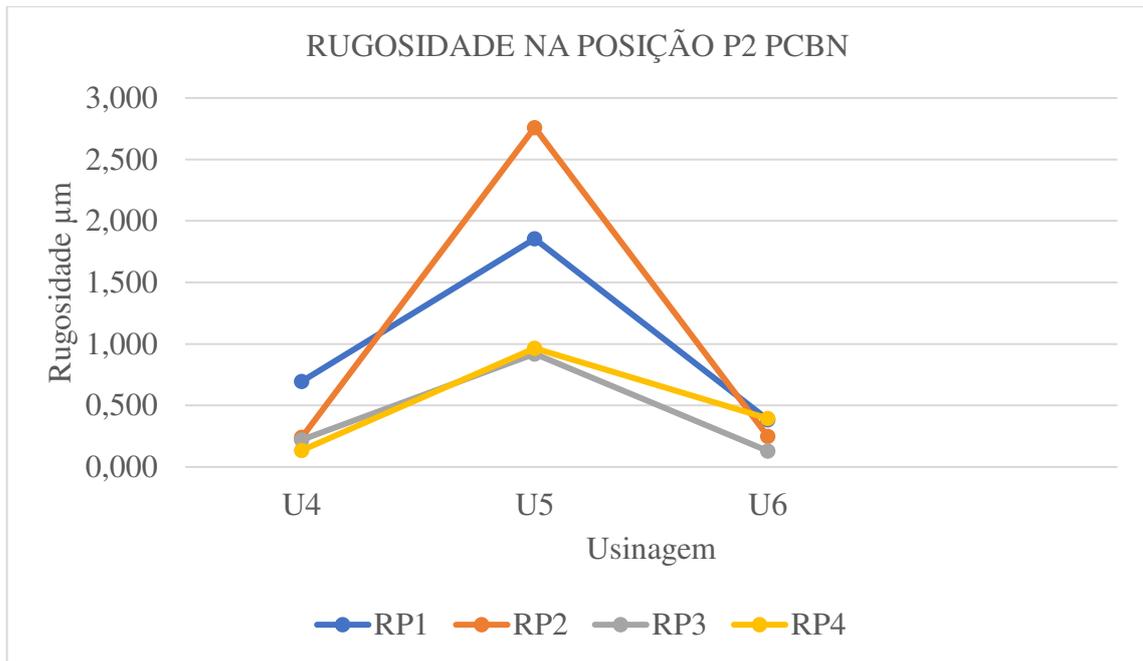
Na figura 22 nota-se um aumento no gradiente na temperatura em todos os pontos, porém observa-se na figura 23 uma diminuição brusca na rugosidade a começar da U5, analisando o desgaste do inserto após a U6 (figura 20).

Figura 22: Temperatura nas posições: CP2 Recozido com PCBN



Fonte: do autor

Gráfico 23: Rugosidade nas posições: CP2 Recozido com PCBN



Fonte: do autor.

5.1.2 Processo de usinagem com inserto de MD do CP recozido

Já na usinagem com inserto de MD onde foi realizada três processos de perfil e três faceamentos de rebaixo conforme valores mostrados na tabela 12 e com suas médias mostradas na tabela 13. Identificou-se conforme figura 24 um aumento crescente da temperatura seguindo o esperado, o aumento gradativo possivelmente devido à baixa usinabilidade característica do aço VC131 segundo afirma Junior (2006). Já na figura 25 após uma diminuição da U1 para U2 houve um aumento considerável da rugosidade para a U3, confirmando a influência do desgaste do inserto (figura 26) na temperatura e na qualidade da superfície usinada.

Pode-se verificar na figura 26 o antes e depois da geometria do inserto de MD. Na figura “a” pode-se ver a aresta de corte sem desgaste, já na figura “b” pode-se observar um desgaste de flanco (SOUZA, 2013). Em relação ao inserto de MD cabe ainda considerar a falta de fluido de corte na usinagem, a usinagem ser do tipo interrompida e a velocidade de corte utilizada de 145m/min ser um pouco menor que os 180 m/min recomendado pelo fabricante.

Tabela 12: Valores das Temperaturas e Rugosidades com MD no CP2 recozido

LEITURA DA RUGOSIDADE E TEMPERATURA NA USINAGEM DO CORPO DE PROVA 2 COM INSERTO DE METAL DURO (MD)									
RF (μm)	TF ($^{\circ}\text{C}$)	TP1 ($^{\circ}\text{C}$)	TP2 ($^{\circ}\text{C}$)	TP3 ($^{\circ}\text{C}$)	TP4 ($^{\circ}\text{C}$)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP2 U1 MD									
PERFIL		47	56	34	35	0,86	0,42	0,21	0,67
		46	54	30	38	0,21	0,21	0,14	0,24
		47	57	26	40	0,71	0,37	0,18	0,65
CP2 F1 MD									
0,28	42	FACEAMENTO							
0,27	44								
0,22	46								
CP2 U2 MD									
PERFIL		58	73	33	34	0,24	0,21	0,65	0,17
		61	76	29	35	0,21	0,19	0,25	0,16
		59	81	28	39	0,22	0,24	0,61	0,18
CP2 F2 MD									
0,33	53	FACEAMENTO							
0,35	69								
0,36	82								
CP2 U3 MD									
PERFIL		65	79	37	35	0,90	0,79	0,86	0,42
		81	100	32	41	0,34	0,41	0,31	0,64
		-	101	31	55	0,74	1,53	0,94	0,19
CP2 F3 MD									
0,93	73	FACEAMENTO							
0,94	77								
0,65	93								

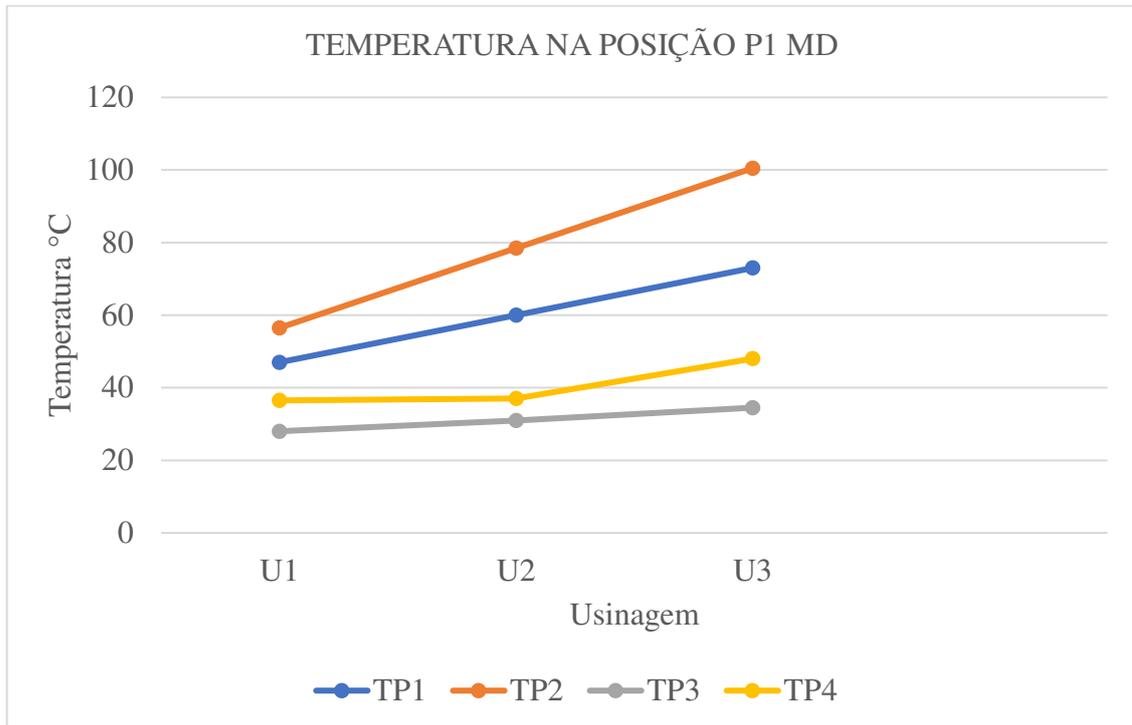
Fonte: do autor.

Tabela 13: Leituras das temperaturas e rugosidades finais com MD

LEITURA DA TEMPERATURA E RUGOSIDADE NA USINAGEM DO CORPO DE PROVA RECOZIDO COM INSERTO DE METAL DURO (MD)										
USINAGEM	RF (μm)	TF ($^{\circ}\text{C}$)	TP1 ($^{\circ}\text{C}$)	TP2 ($^{\circ}\text{C}$)	TP3 ($^{\circ}\text{C}$)	TP4 ($^{\circ}\text{C}$)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP2 MD										
U1	0,275	45,0	47,0	56,5	28,0	36,5	0,785	0,395	0,195	0,660
U2	0,355	75,5	60,0	78,5	31,0	37,0	0,230	0,225	0,630	0,175
U3	1,870	85,0	73,0	100,5	34,5	48,0	0,820	1,160	0,900	0,530
U4										
U5										
U6										

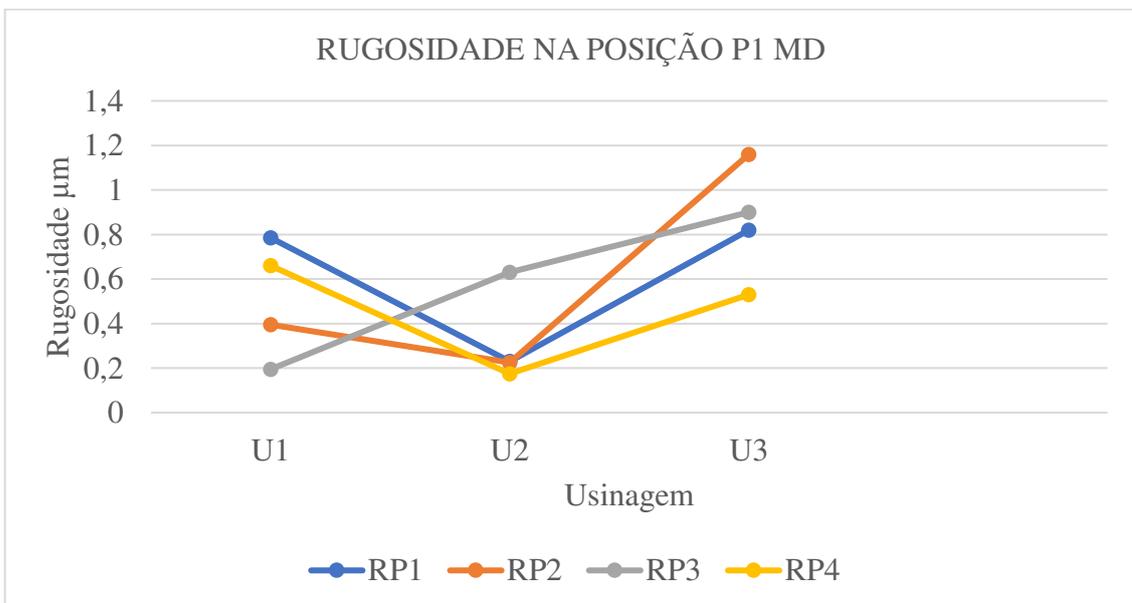
Fonte: do autor.

Figura 24: Temperatura nas posições: CP1 Recozido com MD



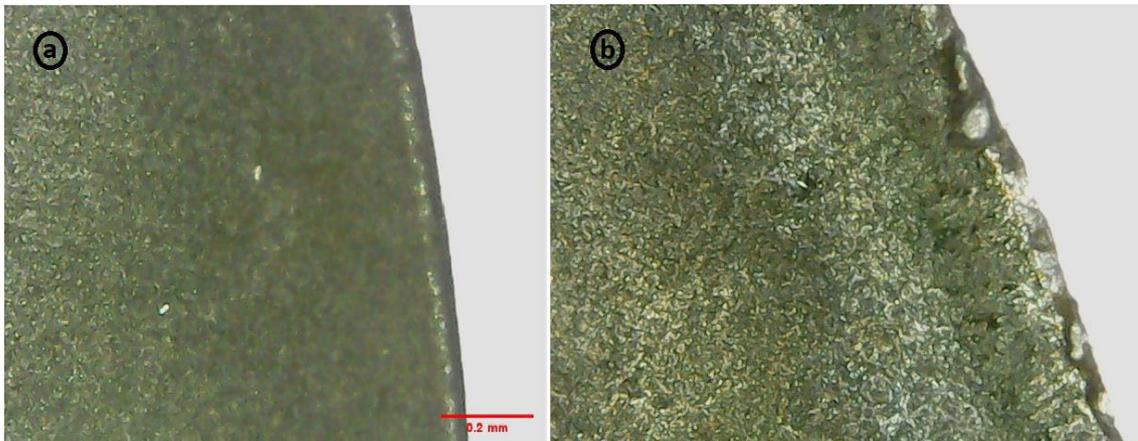
Fonte: do autor

Figura 25: Rugosidade nas posições: CP1 Recozido com MD



Fonte: do autor.

Figura 26: a) inserto MD sem uso; b) Desgaste inserto MD no CP recozido, ampliação 130x



Fonte: do autor

5.1.3 Processo de usinagem com inserto de PCBN do CP endurecido

No processo de usinagem do corpo de prova com tratamento térmico com inserto de PCBN adotou-se como identificação do par de insertos os códigos CBN2TTA1 e CBN2TTA2. Realizou-se sete usinagens de perfil e sete faceamentos de rebaixo conforme tabela 14 e médias mostradas na tabela 15. Devido à alta vibração observada durante a U7 optou-se por não dar continuidade ao processo preservando assim o equipamento CNC.

Tabela 14: Temperatura e Rugosidade na usinagem com PCBN no CP temperado.

LEITURA DA RUGOSIDADE E TEMPERATURA NA USINAGEM DO CORPO DE PROVA TEMPERADO COM INSERTO DE PCBN									
RF (μm)	TF ($^{\circ}\text{C}$)	TP1 ($^{\circ}\text{C}$)	TP2 ($^{\circ}\text{C}$)	TP3 ($^{\circ}\text{C}$)	TP4 ($^{\circ}\text{C}$)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP3 F1 PCBN									
0,38	55								
1,28	67								
0,96	81								
FACEAMENTO F1									
CP3 U1 PCBN									
PERFIL U1		63	80	43	36	0,19	0,81	0,59	0,17
		64	90	38	39	0,19	1,23	0,10	0,15
		60	95	35	42	0,19	0,83	0,11	0,14
CP3 F2 PCBN									
-	64								
	64								
	75								
FACEAMENTO F2									

CP3 U2 PCBN								
PERFIL U2	105	100	39	40	0,18	0,18	0,11	0,15
	66	100	33	44	0,18	0,19	0,10	0,51
	70	105	-	47	0,20	0,19	0,10	0,15
CP3 F3 PCBN								
0,18	61	FACEAMENTO F3						
0,20	66							
0,18	75							
CP3 U3 PCBN								
PERFIL U3	83	95	36	38	0,22	0,17	0,11	0,15
	-	108	36	45	0,49	0,20	0,11	0,13
	-	94	37	52	0,28	0,21	0,13	0,14
CP3 F4 PCBN								
0,18	62	FACEAMENTO F4						
0,20	85							
0,17	81							
CP3 U4 PCBN								
PERFIL U4	117	107	45	39	0,17	0,14	0,17	0,51
	85	118	36	42	0,17	0,16	0,14	0,17
	101	110	33	48	0,16	0,18	0,12	0,24
CP3 F5 PCBN								
0,65	42	FACEAMENTO F5						
0,57	73							
0,64	101							
CP3 U5 PCBN								
PERFIL U5	135	86	31	31	1,02	0,56	0,14	0,56
	87	108	33	33	0,83	0,30	0,12	0,88
	91	101	-	46	0,68	0,79	0,13	0,42
CP3 F6 PCBN								
0,21	-	FACEAMENTO F6						
0,18	90							
0,19	107							
CP3 U6 PCBN								
PERFIL U6	147	106	32	35	0,51	0,14	0,11	0,28
	108	112	32	38	0,38	0,25	0,11	0,26
	109	120	31	50	0,17	0,19	0,10	0,33
CP3 F7 PCBN								
0,54	84	FACEAMENTO F7						
0,17	96							
0,13	105							
CP3 U7 PCBN								
PERFIL U7	122	86	43	34	0,20	0,17	0,33	0,18
	66	86	35	39	0,22	0,16	0,11	0,17
	95	103	32	36	0,21	0,16	0,23	0,42

Fonte: do autor

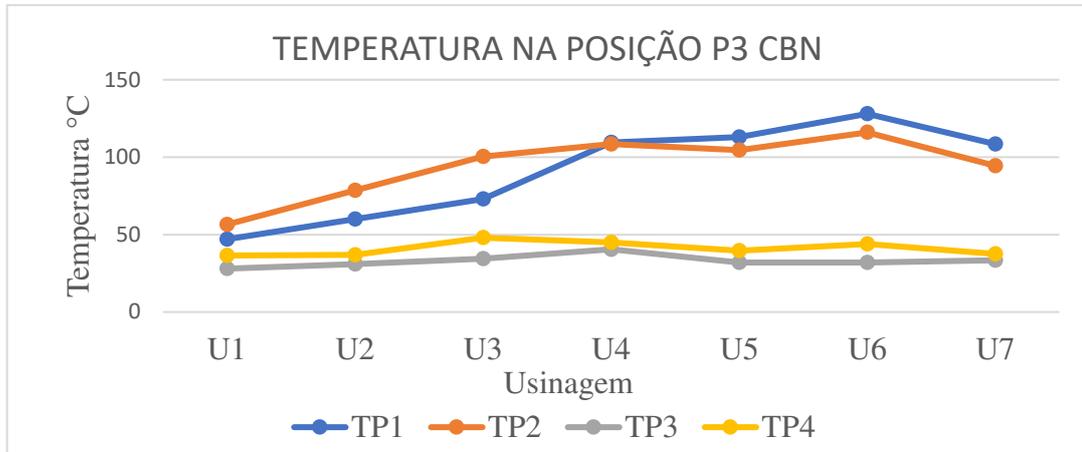
Tabela 15: Médias de temperatura e rugosidade na usinagem com PCBN do CP temperado

LEITURA DA TEMPERATURA E RUGOSIDADE MÉDIA NA USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA TEMPERADO COM INSERTO DE PCBN										
USINAGEM	RF (μm)	TF ($^{\circ}\text{C}$)	TP1 ($^{\circ}\text{C}$)	TP2 ($^{\circ}\text{C}$)	TP3 ($^{\circ}\text{C}$)	TP4 ($^{\circ}\text{C}$)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP3 PCBN										
F1	1,120	74								
U1			63,5	92,5	40,5	40,5	0,190	0,820	0,105	0,160
F2		69,5								
U2			68,0	100,0	36,0	45,5	0,180	0,190	0,100	0,150
F3	0,180	70,5								
U3			83,0	94,5	36,5	48,5	0,250	0,205	0,110	0,145
F4	0,190	83								
U4			109,0	108,5	40,5	45,0	0,170	0,170	0,155	0,205
F5	0,645	87								
U5			113,0	104,5	32,0	39,5	0,925	0,675	0,135	0,490
F6	0,200	98,5								
U6			128,0	116,0	32,0	44,0	0,445	0,220	0,110	0,305
F7	0,360									
U7			108,5	94,5	33,5	37,5	0,215	0,165	0,170	0,175

Fonte: do autor

Conforme pode-se observar na figura 27 há um aumento gradativo mais considerável das temperaturas até a usinagem U6 nas estratégias TP1 E TP2, provavelmente devido ao desgaste progressivo que pode ser visto na figura 29 onde o inserto sem desgaste “a” e após os processos com desgaste “b” observado também na figura 30 com desgaste e na figura 31 com pouco desgaste. Nas figuras 32 (IMD),33,34 e 35 (MEV) pode-se observar melhor os desgastes no par de inserto.

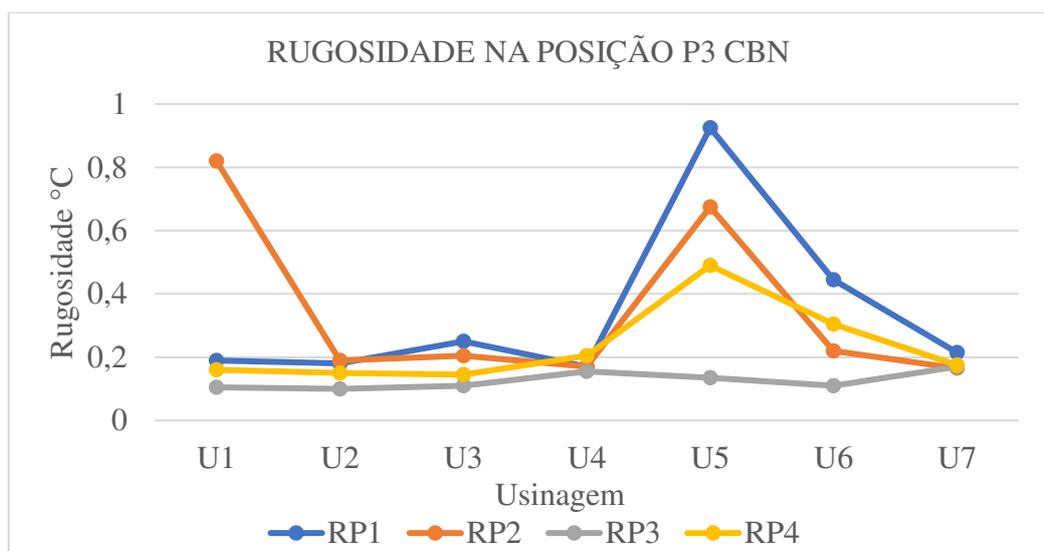
Figura 27: Temperatura na usinagem com PCBN do CP temperado



Fonte: do autor

Na figura 28 observa-se uma discrepância inicial na estratégia RP2 em relação as outras estratégias, uma hipótese que explicaria essa variação seria uma influência externa no que diz respeito a vibrações que o centro de usinagem está sujeito no ambiente da fabricação na hora da aquisição e não mensurada como por exemplo a vibração gerada pelo gerador da refrigeração do painel elétrico e do cooler quando ligado.

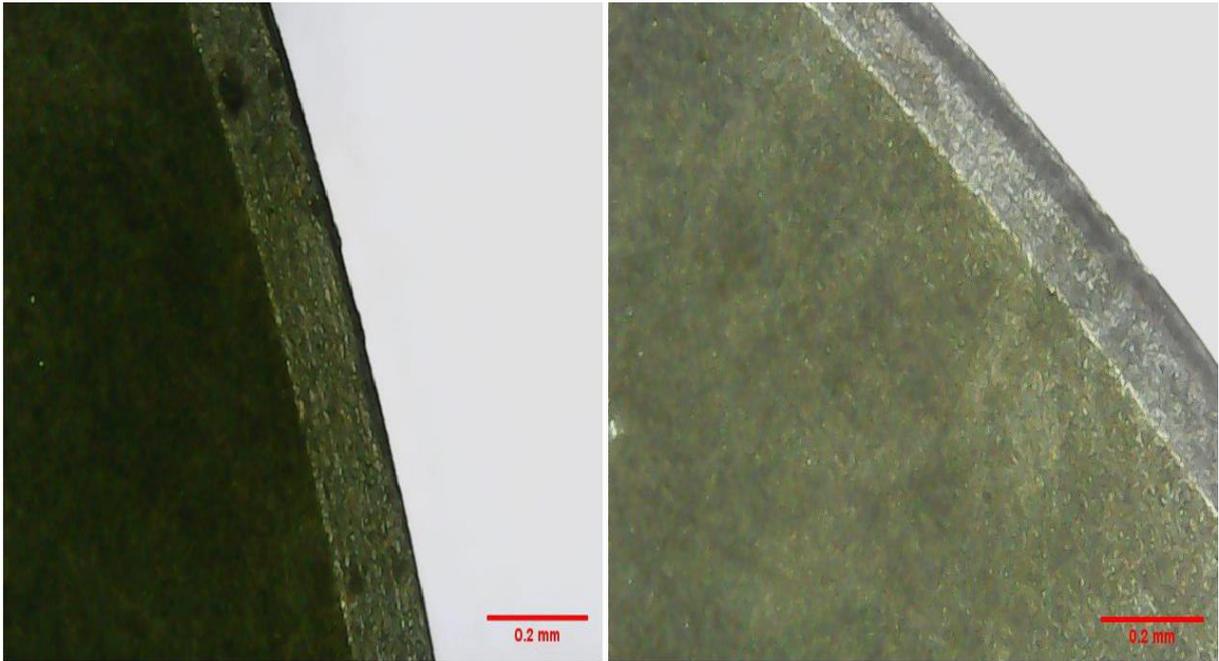
Figura 28: Rugosidade na usinagem com PCBN do CP temperado



Fonte: do autor

A pesar disso as rugosidades nas usinagens seguinte demonstram seguir um padrão, a U1 é a única que se comporta de maneira mais ou menos linear, provavelmente segundo Zanuto (2013) pela característica de ter a menor penetração de trabalho e ter movimento concordante.

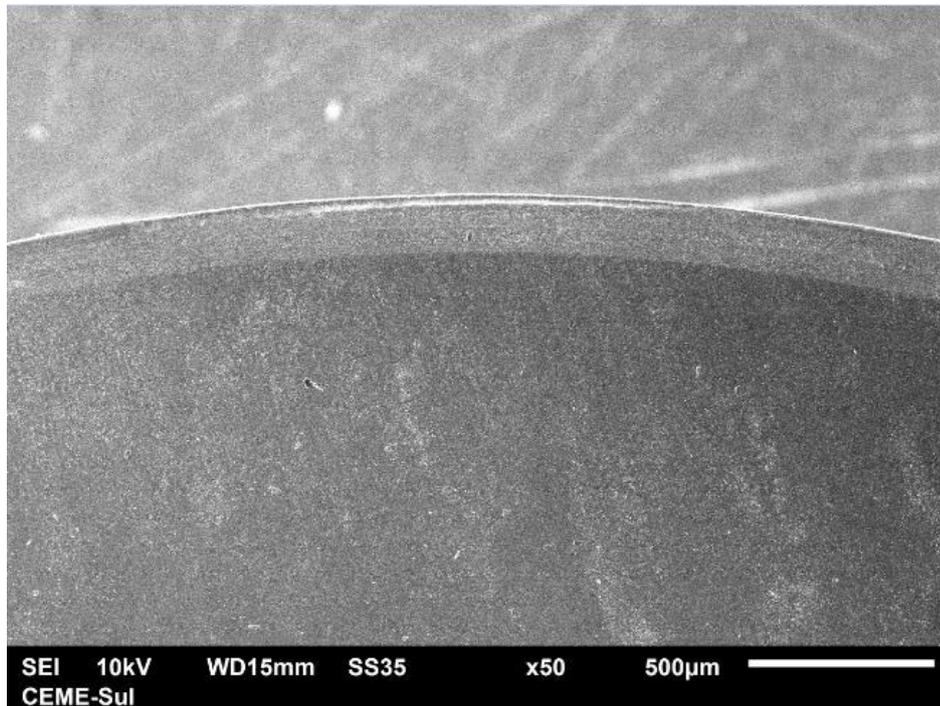
Figura 29: Microscópio Digital: a) inserto PCBN novo; b) inserto PCBN com desgaste. Ampliação 130x



Fonte:do autor

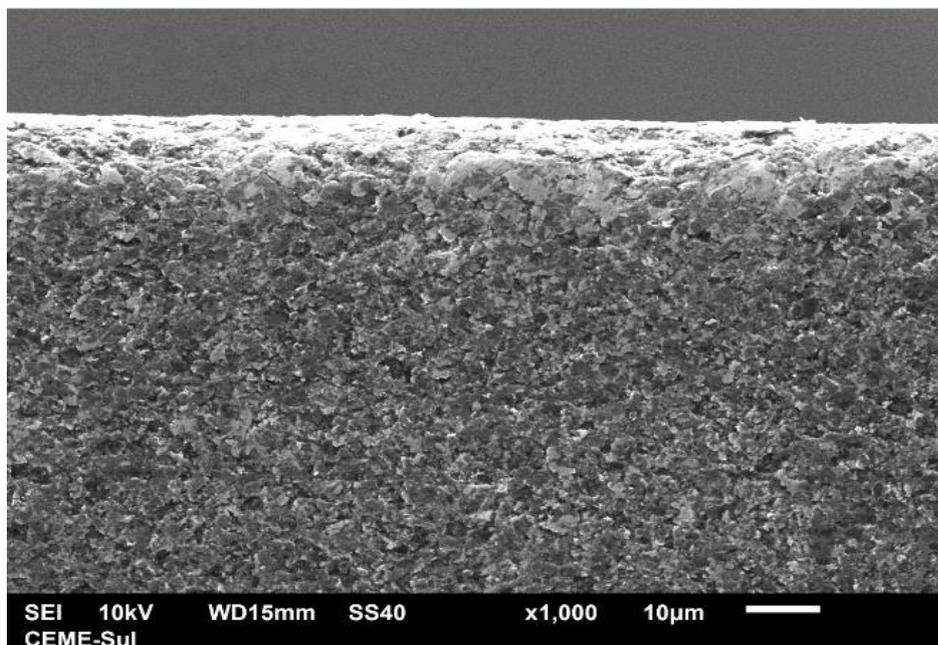
Observa-se também que houve uma diminuição da rugosidade a partir da usinagem U5 fato este visto também na figura 22 onde ocorreu uma diminuição da temperatura porém a partir da usinagem U6. A hipótese que explicaria essa diminuição é o desgaste de cratera identificado nas figuras 32 e 33, que segundo Souza (2013) a formação da cratera na face da ferramenta pode ser relacionada a mecanismos triboquímicos, onde ocorre uma concentração de boro e nitrogênio menor do que no restante do material PCBN, provocada por mecanismos de abrasão e reações química na interface do cavaco e face do inserto. Este mecanismo é capaz em função das pressões e temperaturas excessivamente elevadas na região.

Figura 30: Micrografia em MEV do inserto CBN2TTA1 com desgaste da usinagem CP endurecido. Ampliação x50



Fonte: CEME-Sul

Figura 31: Micrografia em MEV do inserto PCBN com pouco desgaste na usinagem CP endurecido. Ampliação x1,000

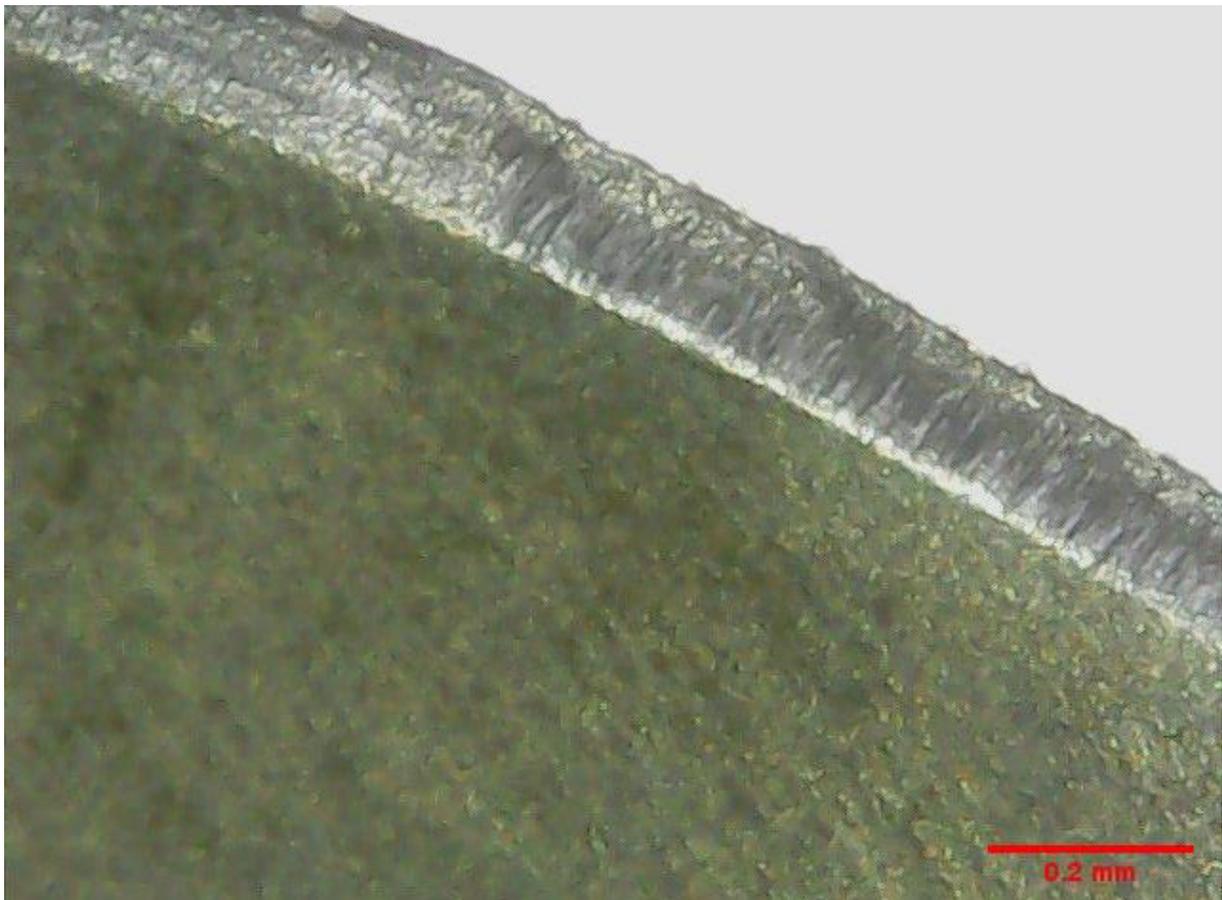


Fonte: CEME-Sul

Esses desgastes diminuiriam a característica principal deste inserto PCBN que possui uma aresta de corte chanfrada de grande inclinação que tem por objetivo aumentar a resistência da ferramenta reduzindo assim o risco da aresta lascas e fraturar, porém o grande ângulo de inclinação negativa conduz a deformação plástica mais grave e temperaturas de corte mais elevadas aumentando o desgaste conforme Saketi (2015).

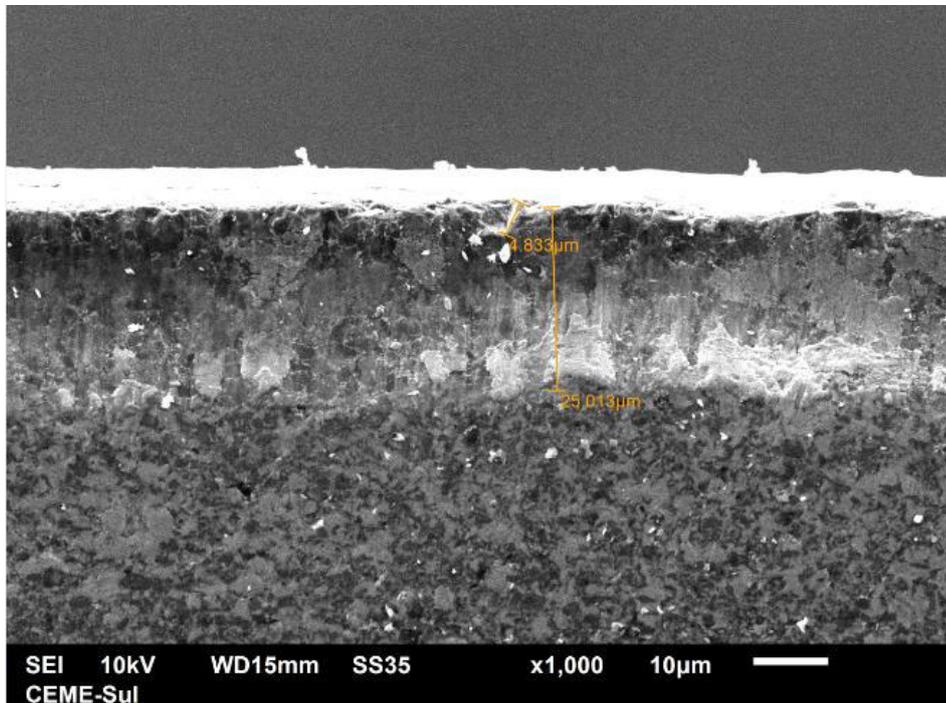
Porém percebe-se uma mudança da geometria da aresta de corte, aparentemente modificando o ângulo de inclinação de negativo para positivo ficando similar a um quebra-cavaco, o que explicaria a melhora da superfície. Porém observa-se também na figura 34 do inserto CBN2TTA2 na área de contato sulcos no desgaste de flanco que está ligado a abrasão do ligante da ferramenta por partículas duras de carboneto das peças ocasionando o arrancamento, fato que explicaria o aumento considerável da vibração na usinagem U7 (SOUZA, 2013)

Figura 32: IMD do inserto PCBN2TTA2. Ampliação 130x



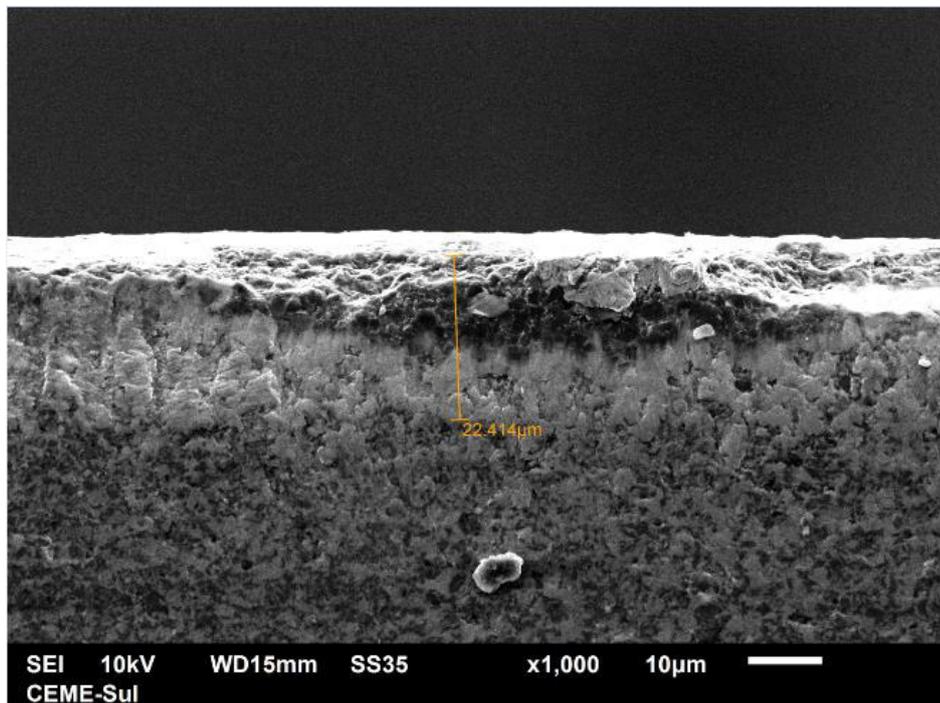
Fonte: do autor

Figura 33: Micrografia em MEV do inserto PCBN2TTA1. Ampliação x1,000



Fonte: CEME-Sul

Figura 34: Micrografia em MEV do inserto PCBN2TTA2. Ampliação x1,000



Fonte: CEME-Sul

CP2 U1 MD								
PERFIL	167	93	50	41	0,160	0,230	0,110	0,160
	106	122	46	54	0,200	0,210	0,100	0,210
	89	117	-	57	0,200	0,230	0,110	0,370
CP2 F1 MD								
0,57	82	FACEAMENTO/ PROCESSO INTERROMPIDO						
0,90	106							
0,97	Quebra							

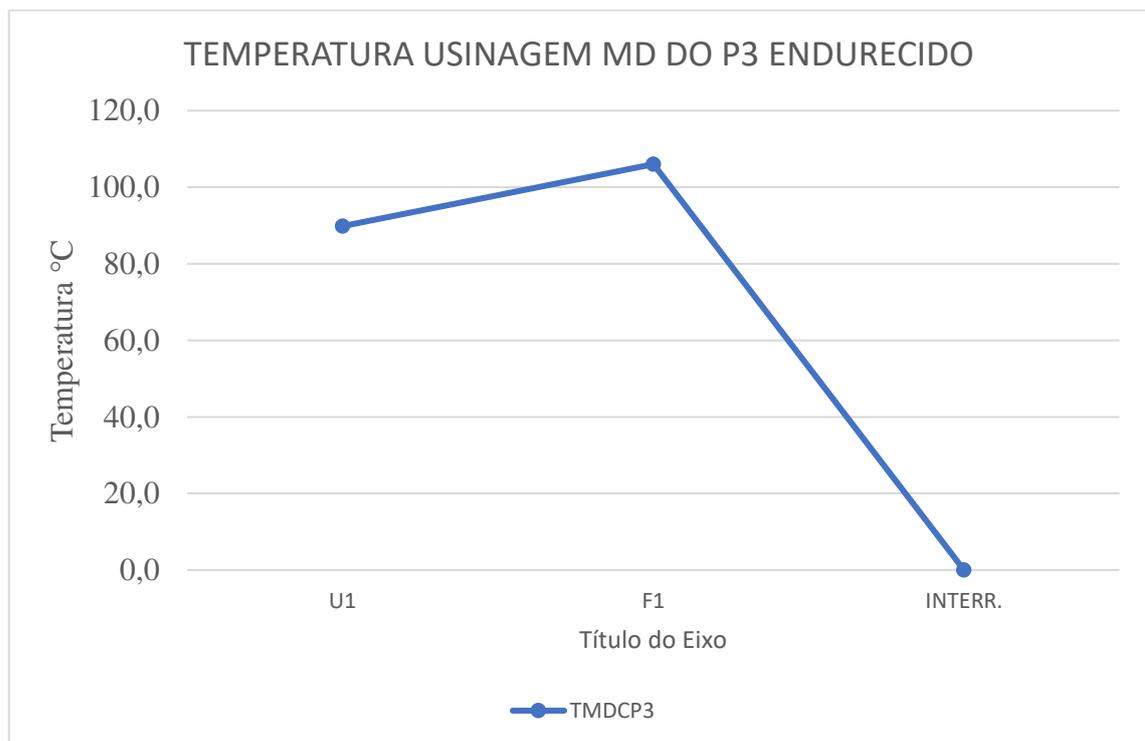
Fonte: do autor

Tabela 17: Médias temperatura da leitura tabela 16

LEITURA DA TEMPERATURA E RUGOSIDADE NA USINAGEM DO CORPO DE PROVA TT TEMPERADO COM INSERTO DE METAL DURO (MD)										
USINAGEM	RF (μm)	TF ($^{\circ}\text{C}$)	TP1 ($^{\circ}\text{C}$)	TP2 ($^{\circ}\text{C}$)	TP3 ($^{\circ}\text{C}$)	TP4 ($^{\circ}\text{C}$)	RP1 (μm)	RP2 (μm)	RP3 (μm)	RP4 (μm)
CP2 MD										
U1			136,5	119,5	48,0	55,5	0,200	0,230	0,110	0,290
MÉDIAS U1 (MU1)			89,8				0,207			
F1	0,935	106								

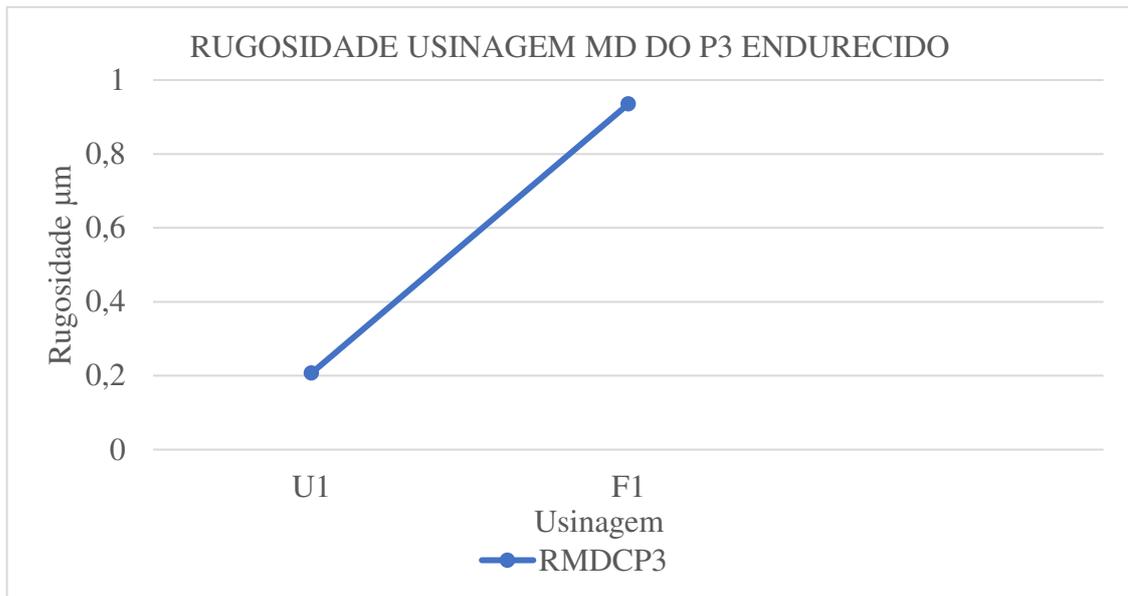
Fonte: do autor

Figura 36: Temperatura usinagem inserto MD TT no CP3 endurecido



Fonte: do autor

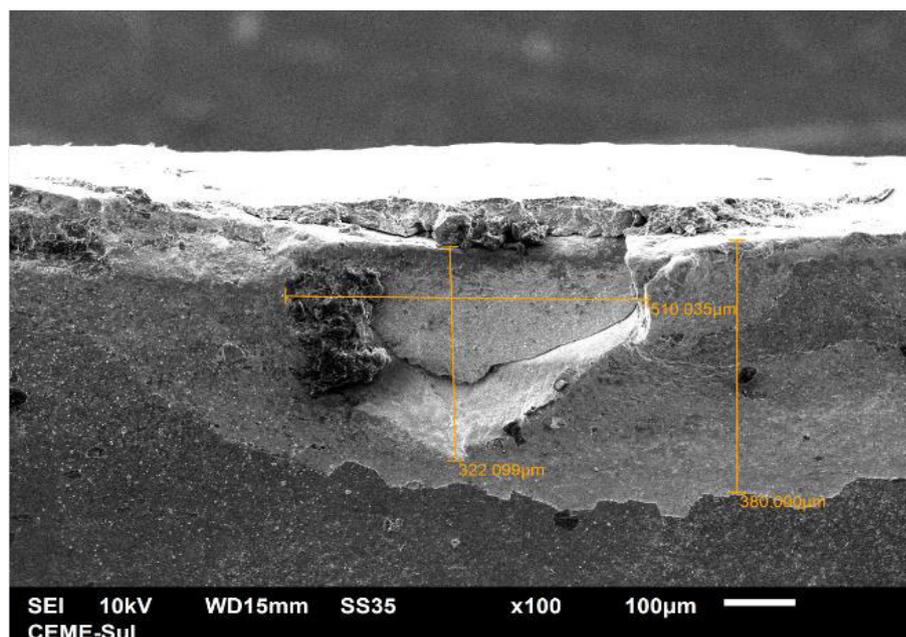
Figura 37: Rugosidade usinagem inserto MD TT no CP3 endurecido



Fonte: do autor

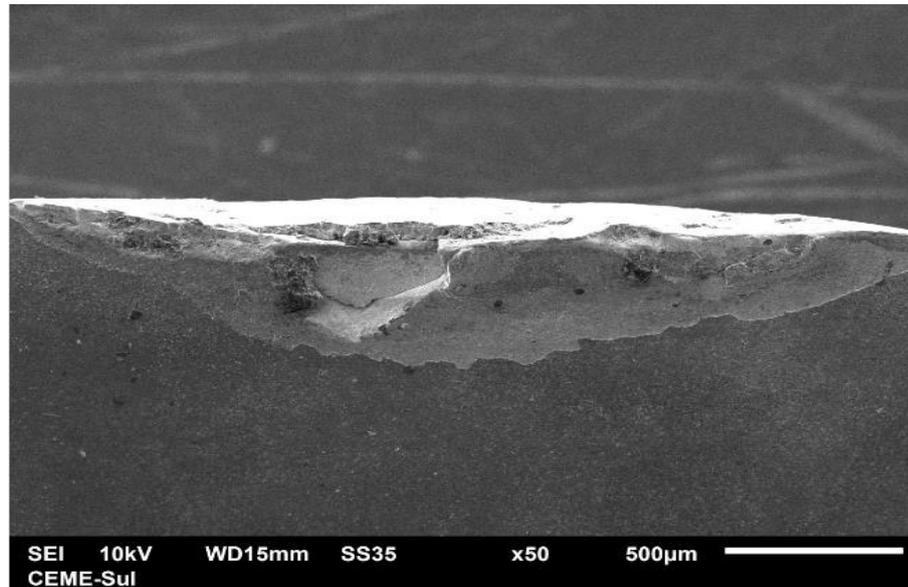
Nas figuras 38 e 39 observa-se uma avaria caracterizada como trinca, lascamento, ou quebra, que segundo Gomes (2015) que são mais comuns acontecer no fresamento com corte interrompido em virtude dos choques térmicos e mecânicos pertencentes a tais processos de usinagem e nesse caso específico deve-se também a velocidade de corte utilizada ter sido maior que a indicada pelo fabricante.

Figura 38: Inserto de MD usinagem CP TT endurecido. Ampliação x100



Fonte: CEME-Sul

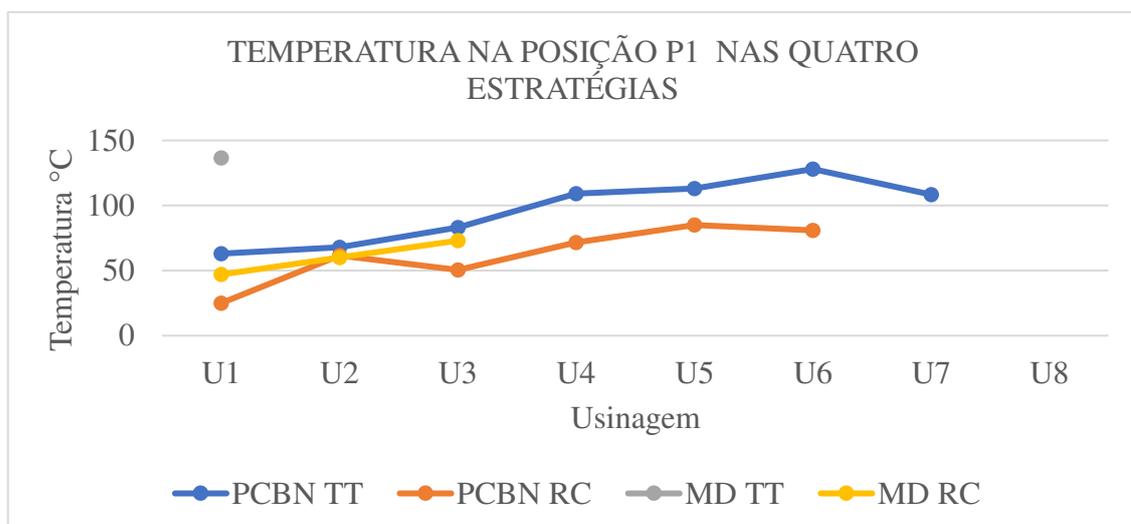
Figura 39: Inseto de MD usinagem CP TT endurecido. Ampliação x50



Fonte: CEME-Sul

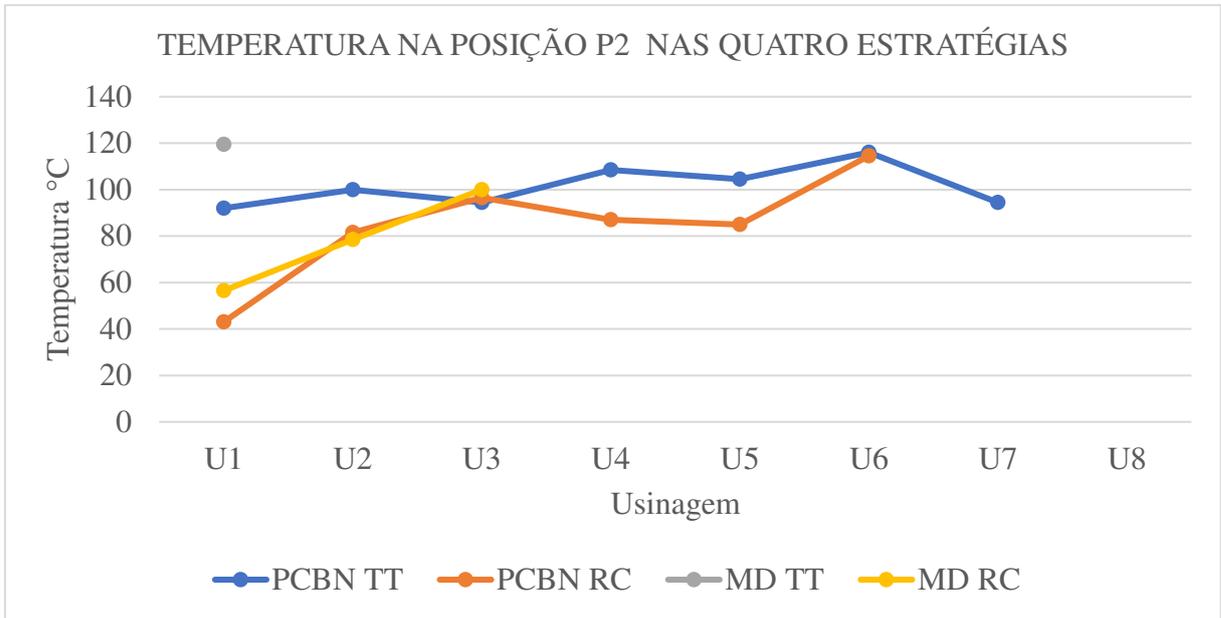
Ao realizar um comparativo das quatro estratégias nas suas respectivas usinagens demonstrado na figura 40 da posição TP1, na figura 41 da posição TP2, na figura 42 da posição TP3 e na figura 43 da posição TP4, observa-se a superioridade dos insertos de PCBN em relação aos insertos de MD, com os parâmetros adotados pode-se dizer que o inserto de MD na usinagem do corpo de prova endurecido não teve desempenho satisfatório e que o inserto de PCBN na usinagem também do corpo de prova endurecido foi a que mais mostrou resultados.

Figura 40- Comparativo entre estratégias na posição TP1



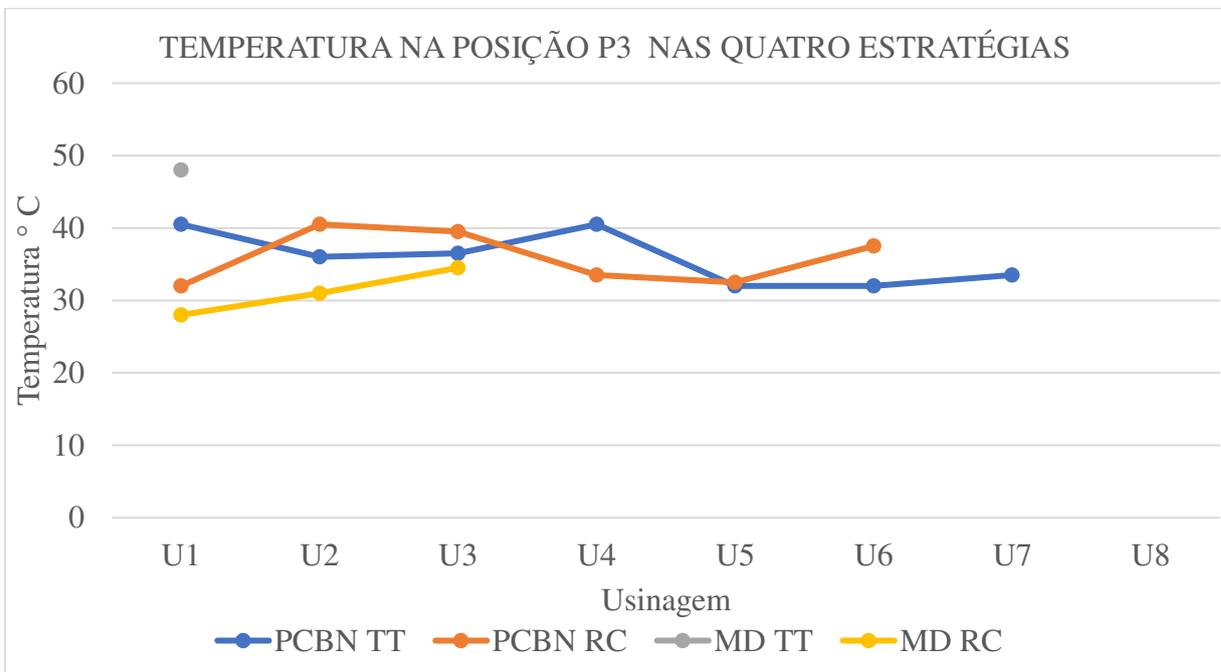
Fonte: do autor

Figura 41: Comparativo entre estratégias na posição TP2



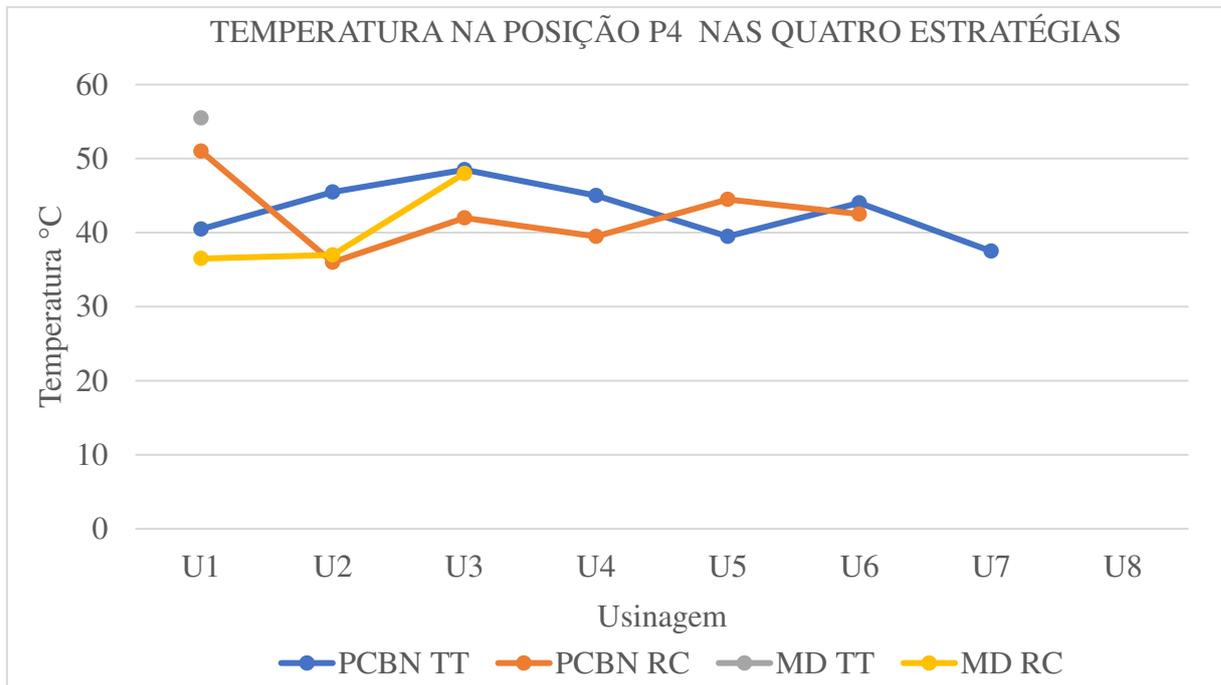
Fonte: do autor

Figura 42: Comparativo entre estratégias na posição TP3



Fonte: do autor

Figura 43: Comparativo entre estratégias na posição TP4



Fonte: do autor

6.CONCLUSÕES

Através dos experimentos realizados neste trabalho podemos concluir que:

- Os resultados dos ensaios mostraram que com os parâmetros utilizados como profundidade de corte de 0,5 mm , avanço de 0,1 mm/rotação, rotação de 2300 rpm e penetração de trabalho variado conforme estratégia usada, qualitativamente o inserto de PCBN obteve um melhor desempenho tanto com o corpo de prova no estado recozido como também no estado temperado e revenido, sendo neste último melhor.
- Além disso foi possível verificar também que o inserto de MD não obteve bom desempenho na usinagem do corpo de prova temperado, assim não sendo indicado seu uso com os parâmetros utilizados neste estudo.
- A ferramenta de metal duro também apresentou um desempenho inferior quando comparado com o inserto de PCBN na usinagem do corpo de prova no estado recozido.
- Os principais desgastes observados no inserto de PCBN foram o desgaste abrasivo de cratera e o desgaste adesivo de flanco por arrancamento quanto utilizado no corpo de prova endurecido; já no corpo de prova recozido foi identificado adesão de material na face da aresta de corte com deformação plástica e um desgaste de flanco mais acentuado.
- Na usinagem com PCBN para os corpos de prova recozido e temperado se obteve uma diminuição da rugosidade e temperatura concomitante com o aumento da vibração no processo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As recomendações para trabalhos futuros são:

- Acrescentar a análise de vibração no processo de usinagem.
- Realizar a aquisição do esforço de corte durante a usinagem.
- Efetuar o estudo do processo de usinagem utilizando o 4° eixo.
- Verificar a influência do processo na geometria do corpo de prova usinado, verificando as dimensões por medição tridimensionais.
- Realizar uma análise das imagens em câmera lenta da ferramenta durante o processo de corte intermitente e corte contínuo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1 REFERÊNCIA NOMINAL

ABNT - **Informação e documentação-Referências-Documentação**. Disponível em: <<https://www.gedweb.com.br/visualizador-lite/>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

ABNT - **Materiais Metálicos - Determinação da Dureza Vickers (Método de Ensaio)**. [S.I.]: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1981. NBR 6672/81.

ACCADROLLI, G. **Análise de desgaste de materiais aplicados em ferramentas de forjamento a frio**. 2020. 114 folhas. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

AMÉRICO, E. P.; **Estudo de caso: Tratamento Térmico de Punções da Chapa Lateral de Silos para Armazenagem de Grãos**. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Graduação em Engenharia dos Materiais, Florianópolis – SC, 2007

BOBROVNITCHII G., FILGUEIRA M. A Influência de Tratamento Térmico Complementar sobre a Resistência ao Desgaste de Pastilha de Nitreto Cúbico de Boro. **Revista Matéria**, v. 1, n. 3, pp 238–242, 2006.

BORBA, Vinícius Rodrigues. **Análise da força de usinagem e da rugosidade no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de pcbn e de metal-duro**. 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

BOTKO F. ;HATALA M., KORMOS M.; UNGUREANU N., PETER SOLTES P. Usando Edgcam para criar programas CNC em processo de educação. **SAMI 2015 • IEEE 13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics • 22-24 de janeiro de 2015 • Herl'any, Eslováquia**

DE SÁ, V. M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com tin no fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de diâmetros diferentes**. 2010. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte- MG. 2010

ESPANHOL, V. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. 2008 . Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre -RS. 2010.

FERRARI, Alfredo. **Ferramentarias e modelações cada vez mais produtivas**. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/colunistas/ferramentarias-e-modela-es-cada-vez-mais-produtivas>> Acesso em: 07 nov. 2019.

GOMES Manoel Amâncio. **Estudo do fresamento frontal com alta velocidade de corte no aço ferramenta (VH13ISO) endurecido na operação de semi-acabamento**. 2015. 119 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte- MG. 2015

JÚNIOR Welber Vasconcelos Leadebal. **Influência da refrigeração criogênica na vida da ferramenta de PCBN e na integridade superficial do aço ferramenta D6**. 2017. 94 F. Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal- RN. 2017.

JUNIOR, Edmo Soares. **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços-ferramentas para trabalho a frio**. 2006. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Autarquia associada a Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2006.

KATUKU K.; KOURSSARIS A. ; SIGALAS I. Wear mechanisms of PcBN cutting tools when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron under finishing conditions. **ELSEVIER**. Johannesburg, South Africa.p. 294-301, 2010.

MATSUMOTO, H.; PEDROSA, E. A.; DINIZ, A. E. **Análise do torneamento de aços endurecidos utilizando ferramentas de PCBN**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa - PB, Agosto 2002.

MORAIS, R. R.; MONTEIRO, R. **A indústria 4.0 e o impacto na área de operações: Um ensaio**. V SINGEP – Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. São Paulo – SP, Novembro 2016.

PAZ Vinicius Freitas. **Estudo e caracterização metalográfica da resistência ao desgaste em aços ferramenta sinterizados, temperados a vácuo, utilizados em matrizes de estampagem**. 85f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre -RS. 2016

PEREIRA J. E.A.; NETO I. de M.; ALEXANDRE R. P.; MATSUMOTO H.; PEREIRA J. A. Influência do Desgaste da Ferramenta na Rugosidade da peça e nos Sinais de Vibração no Processo de Torneamento. **ABCM 2004**, Instituto Politécnico. Nova Friburgo -RJ.

PIVETTA, Carlos Sergio. **Uma contribuição ao estudo do fresamento de aço endurecido com fresa de topo esférico**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2005.

PU, Zhengwen; SINGH, Anshul. High speed ball nose end milling of hardened AISI A2 tool steel with PCBN and coated carbide tools. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 15, p. 467-473, 15 out. 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.05.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612513000650>. Acesso em: 10 out. 2019.

REVISTA FERRAMENTAL. **A indústria 4.0 na fabricação de moldes e matrizes**. Disponível em:< <https://www.revistaferramental.com.br/?cod=artigo/industria-4-0-fabricacao-moldes-matrizes/>> Acesso em: 07 nov. 2019.

SACRAMENTO R.; DA SILVA W. T. A.; FARO R.; BEGOSSI M. V. Tratamento térmico em material D6 a fim de se obter material endurecido. **1º Simpósio das Faculdades de Tecnologia SENAI-SP.v.1 n.3. janeiro -2019**.

SAKETI S.; SVEEN S.; GUNNARSON S.; SAOUBI R. M.; OLSSON M. Desgaste de uma ferramenta de alta cBN conteúdo de corte PCBN durante a moagem duro dos aços ferramenta de trabalho a frio de metal em pó. **Elsevier**. Janeiro. Suécia 2015

SANDVIK. **CoroMill 216F Fresa de topo para perfilamento de acabamento fino**. < https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coromill_216f/Pages/default.aspx> Acesso em: 08 nov. 2019.

SANDVIK. **Materiais de ferramentas de corte**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>. Acesso em: 19 nov. 2019. SANDVIK. **Torneamento de peças duras com CBN**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/c-2940-137.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2014.

SILVA, Fábio Fernandes da. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento com ferramenta de topo esférico do aço AISI D6 endurecido**. 2018. 164 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2018.

SILVA, Raimundo Nonato Alves da *et al.* Análise comparativa com diferentes tratamentos térmicos no aço VC 131. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia 73^a**, [S. l.], ano 2016, p. 5, 1 set. 2016.

SOUZA Dilson José Aguiar. **Influência da microgeometria do gume e da classe de pcbn no corte ortogonal de aço rápido fabricado por metalurgia do pó**. 2013. 146f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2013.

SOUZA, D. J. A. D.; SCHROETER, R. B; WEINGAERTNER, W. L.; TEIXEIRA, C. R. Estudo da influência da geometria do gume no desgaste. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação - COBEM 2011**, Caxias do Sul - RS, 2011.

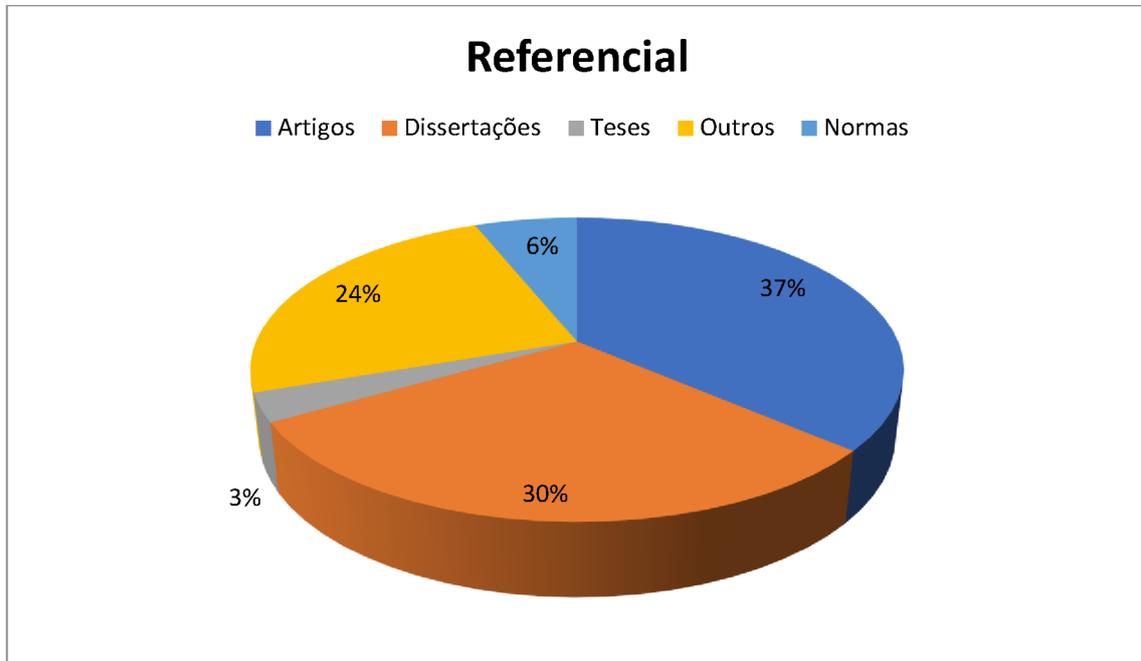
SOUZA, Guilherme Oliveira de. **Fresamento em 5-eixos simultâneos de pás de compressores de turbinas a gás TiAl6V4**. 2006. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2006.

VILLARES. **Aço ABNT VC131**. Disponível em: <http://www.villares.com.br/produtos/trabalhoafrio/vc131>. Acesso em: 05 nov. 2019.

VILLARES. **Aço para trabalho a frio - VD2**. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/produtos/trabalhoafrio/VD2>. Acesso em: 05 nov. 2019.

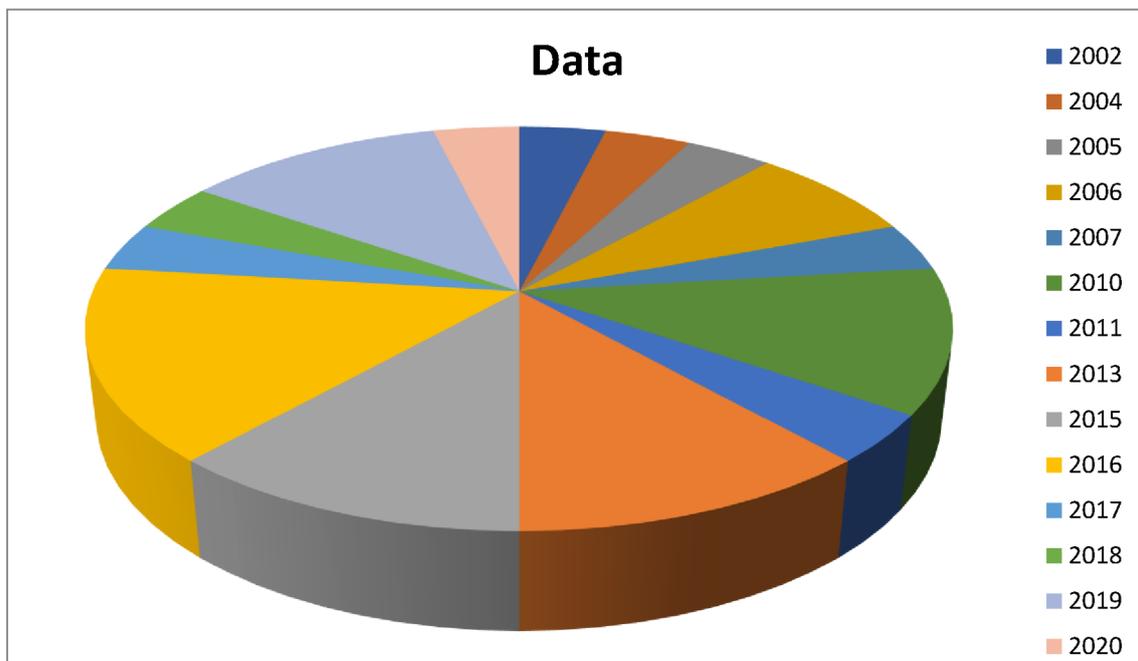
ZANUTO, R. S.; HASSUI, A.; CORREA F. S. Perfil de rugosidade no faceamento do aço inoxidável 15-5 PH utilizando fresas com pastilhas intercambiáveis redondas **7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação-7º COBEF 2013**, Penedo, Itatiaia-RJ- Brasil.

8.2 REFERÊNCIA POR EXTRATO



Fonte: do autor

8.3 REFERÊNCIA POR DATA



Fonte: do autor

APÊNDICE A- GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA

