

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KAMILLA CATÃO GOMES

Comparativo entre ferramentas de materiais de nitreto de boro cúbico e cerâmica à base de alumina: Estudo de caso realizado em uma empresa do Polo Industrial de Manaus

MANAUS

2021

KAMILLA CATÃO GOMES

Comparativo entre ferramentas de materiais de nitreto de boro cúbico e cerâmica à base de alumina: Estudo de caso realizado em uma empresa do Polo Industrial de Manaus

Trabalho de conclusão de curso requisitado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Amazonas (UEA),

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Garcia Del Pino

MANAUS

2021

G633c Gomes, Kamilla Catão

Comparativo entre ferramentas de materiais de nitreto de boro cúbico e cerâmica à base de alumina: Estudo de caso realizado em uma empresa do Polo Industrial de Manaus / Kamilla Catão Gomes. Manaus : [s.n], 2021. 59 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2021.

Inclui bibliografia

Orientador: Dr. Gilberto Garcia Del Pino

1. Produtividade. 2. Usinagem. 3. Pastilha de Nitreto Cúbico de Boro. 4. Pastilha de Cerâmica à base de alumina. 5. Vida útil. I. Dr. Gilberto Garcia Del Pino (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Comparativo entre ferramentas de materiais de nitreto de boro cúbico e cerâmica à base de alumina: Estudo de caso realizado em uma empresa do Polo Industrial de Manaus

KAMILLA CATÃO GOMES

Comparativo entre ferramentas de materiais de nitreto de boro cúbico e cerâmica à base de alumina: Estudo de caso realizado em uma empresa do Polo Industrial de Manaus

Este Trabalho de Curso foi considerado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora.

Manaus, 18 de dezembro de 2021

Banca examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Gilberto García del Pino



Prof. Dr. Marcos Dantas dos Santos



Prof. Dr. Aristides Rivera Torres

Dedico este trabalho de curso a minha mãe, meu pai e minha irmã, por todas as vezes que se esforçaram para me oferecer condições de estudos, pela dedicação incondicional dos meus pais, sempre me apoiando e acreditando no meu potencial. E, minha irmã, por me proporcionar apoio e segurança nos momentos desafiadores. Todo meu esforço e dedicação é por vocês.

Gratidão.

AGRADECIMENTOS

A chegada da pandemia no ano de 2020 colocou o mundo inteiro em alerta e muitas pessoas perderam seus entes queridos e até hoje algumas sofrem o reflexo negativo da COVID-19. Por isso, meu maior motivo de agradecimento é pela minha vida, eternamente grata a Deus e Jesus Cristo, pela saúde dos meus familiares, pela oportunidade de poder viver um dos momentos mais especiais da minha vida.

Agradeço imensamente aos meus pais, Maria do Perpetuo Socorro Catão Gomes e Francisco dos Santos Gomes por terem me acompanhado todos esses anos na graduação, pelo apoio proporcionado, amor, dedicação e esforço financeiro para que eu tivesse a oportunidade de concluir o este curso, minha gratidão incondicional. Agradeço também minha irmã, Neyla Catão Gomes, pelo incentivo, por acreditar em mim e por não medir esforços quando o assunto era em me ajudar ou contribuir com relação aos meus estudos, gratidão pelo companheirismo nos momentos desafiadores. Assim como, agradeço meu namorado Pedro Felipe Mendonça Campos, onde desde o início do curso esteve presente e sempre se manteve disposto em ajudar com meus projetos acadêmicos, grata pelo companheirismo durante os estudos e pela torcida em cada conquista alcançada. Aproveito para agradecer as minhas tias Elizabeth Gomes e Dora Gomes, pelo incentivo aos meus estudos e pelo acompanhamento durante toda essa trajetória e todos os familiares que participaram dessa tão importante fase da minha vida profissional.

Grata pelos professores do Curso de Engenharia Mecânica pela dedicação diária em desenvolver os alunos da Universidade do Estado do Amazonas, pelos grandes conhecimentos repassados.

Aos meus amigos, que tive o privilégio de conhecer e a oportunidade de partilhar dos mesmos sentimentos que a faculdade nos oferece, sejam eles bons ou difíceis, sempre buscamos manter a união e ajudar um ao outro. Torço por cada um, e não há dúvidas de que serão profissionais competentes e capacitados para exercer a profissão que escolheram.

Ao orientador Gilberto Garcia del Pino por ter compartilhado seus conhecimentos e experiência, pela orientação repassada e direcionamento das atividades, sempre buscando formas para o desenvolvimento e melhoria do presente trabalho.

Não tenha medo. Sejam focados. Sejam determinados. Tenham esperança. Sintam-se empoderados. Encontrem esse poder na educação. Depois disso, usem essa educação para construir um país que mereça o vosso potencial ilimitado. Liderem por exemplo e com esperança, nunca com medo.

Michelle Obama

RESUMO

Ao passo que a tecnologia avança em grandes passos e aponta constantemente as novas diretrizes do mercado, as empresas precisam criar formas para desenvolver seus processos de maneira contínua para manter-se competitiva no seguimento em que atua. Isso exige que empresas busquem formas de otimizar seus processos de fabricação, a fim de elevar a produtividade, a qualidade do produto e constantemente reduzir custos para investir em áreas que os avanços tecnológicos nos apresenta. Por isso, é importante analisar em como os fluxos produtivos podem ser melhorados para se tornar eficazes. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um comparativo entre duas pastilhas de corte, sendo a primeira de nitreto de boro cúbico e a segunda de cerâmica à base de alumina em um processo de mandrilamento da camisa do cilindro de uma motocicleta, o material da peça a ser usinado é o ferro fundido cinzento. Desse modo, a finalidade é avaliar a ferramenta mais adequada em termos de produtividade, custos e que atenda as qualidades dos processos conforme o especificado, por meio do monitoramento de vida útil das pastilhas de corte, identificando as propriedades do material a ser usinado, parâmetro de corte para ferramenta e rugosidade da peça. A partir disso, será possível determinar o material de fabricação da pastilha mais viável e que atenda as especificações do processo de usinagem.

Palavras-Chave: Produtividade. Usinagem. Pastilha de Nitreto Cúbico de Boro. Pastilha de Cerâmica à base de alumina. Vida útil.

ABSTRACT

As technology advances in great strides and constantly points to new market guidelines, companies need to create ways to develop their processes continuously to remain competitive in the segment in which they operate. This requires companies to look for ways to optimize their manufacturing processes in order to increase productivity, product quality and constantly reduce costs to invest in areas that technological advances present to us. Therefore, it is important to analyze how productive flows can be improved to become effective. The present work aims to present a comparison between two cutting inserts, the first of cubic boron nitride and the second of alumina-based ceramic in a process of boring the cylinder liner of a motorcycle, the material of the part to be machined is grey cast iron. The purpose is to evaluate the most appropriate tool in terms of productivity, costs and that meets the qualities of the processes as specified, through the monitoring of the service life of the cutting inserts, identifying the properties of the material to be machined, cutting parameters for tool and roughness of the part. From this, it will be possible to determine the most viable insert manufacturing material that meets the specifications of the machining process.

Keywords: Productivity. Machining. Boron Cubic Nitride Tool. Alumina-based ceramic tool. Tool Life.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de mandrilamento com inserto e peça usinada	21
Figura 2 – Desenvolvimento de materiais para ferramenta de corte	26
Figura 3 – Comparativo das propriedades dos materiais cerâmicos, metal duro e cermet....	28
Figura 4 –Tipo de Desgaste de Flanco em uma ferramenta de corte	33
Figura 5 –Ilustração Desgaste de Flanco.....	34
Figura 6 –Tipo de Desgaste de Cratera em uma ferramenta de corte	35
Figura 7 –Tipo de Desgaste de Entalhe em uma ferramenta de corte	36
Figura 8 –Mecanismo de desgaste na usinagem em função da temperatura de corte	37
Figura 9 – Relação de entrada e saída para o mandrilamento	45
Figura 10 –Camisa do Cilindro do Motor	46
Figura 11 –Diâmetro da Camisa do Cilindro do Motor em estado bruto	47
Figura 12 –Diâmetro da camisa do cilindro do motor após usinagem.....	47
Figura 13 –Pastilha de corte de Nitreto Cúbico de Boro utilizado no processo de mandrilamento	48
Figura 14 –Especificações da Ferramenta CBN.....	49
Figura 15 –Pastilha de cerâmica do processo de mandrilamento.....	50
Figura 16 –Especificações da Ferramenta Cerâmica.....	51
Figura 17 –Imagens da pastilha de corte CBN nova	53
Figura 18 –Imagens da pastilha de corte CBN após usinagem de 300 peças.....	54
Figura 19 –Imagens da pastilha de corte CBN após a quebra	54
Figura 20 –Imagens da pastilha de corte cerâmica nova.....	55
Figura 21 –Imagens da pastilha de corte cerâmica após usinagem de 900 peças	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo das características dos principais materiais indicados para ferramentas de corte	24
Tabela 2 – Aplicação de classes de ferramentas cerâmicas.....	29
Tabela 3 – Tipos de desgaste e danos em uma ferramenta de corte.....	31
Tabela 4 – Acompanhamento de vida útil e rugosidade da pastilha de corte.....	53
Tabela 5 – Acompanhamento peças produzidas e rugosidade da pastilha de cerâmica.....	56
Tabela 6 – Comparativo entre as pastilhas de corte	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Usinabilidade dos Ferro Fundidos.....	24
Gráfico 2 –Demonstrativo entre o padrão e as medições de rugosidade das peças.....	57

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLA

HV	Hardness Vickers
CERMET	Material Composed of Ceramic and Metal Material
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
HBN	Nitreto Hexagonal de Boro
SiALON	Nitreto de Alumínio e Silício

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivo geral	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 PROCESSO DE MANDRILAMENTO.....	20
2.1.1 Evolução Histórica da Usinagem	21
2.1.2 Usinabilidade dos Materiais	22
2.1.4 Ferro Fundido Cinzento.....	25
2.2 FERRAMENTA DE CORTE	25
2.2.1 Materiais para Ferramenta de Corte em Usinagem	27
2.2.2 Tipos de Insetos de Cerâmicas	27
2.2.3 Tipos de Inseto de Nitreto de Boro Cúbico.....	30
2.3 TIPOS DE DESGASTES EM FERRAMENTAS DE CORTE.....	31
2.3.1 Desgaste de Flanco	33
2.3.2 Desgaste de Cratera	34
2.3.3 Desgaste de Entalhe.....	35
2.4 MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DECORTE.....	36
2.4.1 Adesão	36
2.4.2 Abrasão.....	37
2.4.3 Difusão	37

2.4.4 Oxidação.....	37
2.5 IMPACTOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM.....	38
2.5.1 Velocidade de Corte	38
2.5.2 Avanço.....	39
2.5.3 Velocidade de Avanço.....	39
2.5.4 Profundida de Corte.....	40
2.5.5 Rugosidade teórica da superfície acabada	40
3. METODOLOGIA.....	42
3.1 MÉTODO.....	42
3.1.1 Material da peça usinada	42
3.1.2 Ferramenta de Corte	43
3.1.3 Rugosidade	43
3.1.4 Parâmetro de Corte	44
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	46
4.1 DETALHAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM	46
4.2 COMPARATIVO E ESPECIFICAÇÕES DAS PASTILHAS DE CORTE.....	46
4.2.1 Especificações da pastilha de nitreto cúbico de boro	46
4.2.2 Especificações da pastilha de cerâmica	48
4.3 DESEMPENHO E VIDA ÚTIL DAS PASTILHAS DE CORTE.....	51
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.1 CONCLUSÃO.....	57
5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário nota-se um índice de crescimento significativo no segmento de duas rodas, movidos pelos avanços tecnológicos e a alta demanda que existe nesse meio, uma vez que as motocicletas são vistas como um veículo que possui maior facilidade de locomoção. O aumento da demanda faz com que as empresas responsáveis por fornecer esses veículos adotem progressivamente meios de otimizar seus processos de fabricação, a fim de manter-se competitiva no mercado em que estão inseridas.

Aas motocicletas são estruturadas pelo chassi que dá suporte aos componentes e pelo motor que é caracterizada como a parte funcional da moto e entre seus principais componentes, estão os cilindros e pistões do motor, e sua fabricação solicita alta tecnologia uma vez que são utilizados diversos processos de fabricação.

O processo de fabricação é caracterizado em duas partes: fabricação sem remoção de material, que são compostos pelo processo de soldagem, fundição e conformação, e os processos com remoção de material, que se relaciona diretamente com a usinagem, que é a etapa responsável pelo acabamento final das peças que compõem o motor.

A usinagem é um tipo de processo que possui aplicabilidade em diversos setores da indústria, por sua ampla possibilidade de fabricação de peças e componentes, como em materiais sólidos como metais, madeiras e plásticos. Onde sua principal função é definir a forma, dimensão e acabamento superficial de um metal, por meio da remoção de material que se transformam em partículas menores de formato indefinidos denominadas de cavacos sendo removidas pela ferramenta de corte. A remoção de material ocorre com a interação entre a ferramenta e a peça, e o material de fabricação da ferramenta deve conter propriedades de dureza e resistência elevado em comparação com a peça que será usinada. A maioria das peças e produtos passam durante sua sequência de confecção por algum processo de usinagem.

O estudo aprofundado da usinagem reúne diversas análises de estudo, fenômenos de formação de cavaco, esforço de corte da ferramenta, qualidade superficial do material usinado, desgaste prematuro de ferramentas, influência dos parâmetros de corte, projeto e estrutura dos dispositivos responsáveis pelo assentamento da peça e a maneira como a peça será usinada, refrigeração e o óleo de corte utilizado. Comumente, o processo de usinagem possui as seguintes etapas, o desbaste, o excesso de material é retirado, deixando-se uma pequena

quantidade de material, denominada de sobremetal para etapa do acabamento. O acabamento retirar o material restante, e delimita as medidas dimensionais e geométricas do processo, com as tolerâncias constantes no desenho da peça. O processo de usinagem escolhido para estudo, é o mandrilamento da camisa do cilindro do motor e é caracterizado como desbaste, uma vez que é anterior ao processo de acabamento.

Por isso, nesse contexto, o objetivo principal desse trabalho é realizar uma análise comparativa dos desgastes de pastilhas de corte que possuem diferentes materiais de fabricação, sendo em específico, o detalhamento das características de pastilhas de corte de nitreto de boro cúbico e material cerâmico, desenvolvendo testes para avaliar a rugosidade do processo, os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, a fim de determinar a capacidade produtiva de cada ferramenta, reduzindo perdas no processo e paradas de máquinas por motivo de desgaste do ferramental.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme visto anteriormente, a aplicabilidade do processo de usinagem está presente e tem grande importância em diversos setores nos processos de fabricação, dando destaque para o setor industrial que tem como base a produção contínua de peças. Com o surgimento de novas tecnologias e materiais mais resistentes para ferramentas de corte, faz-se necessário que as empresas se tornam cada vez mais adaptadas com esses avanços, a fim de manter-se competitiva no mercado. Dessa forma, o estudo de pastilhas de corte é de extrema relevância, para verificar métodos e soluções a fim de aumentar a eficiência do processo produtivo alavancando o desempenho das empresas no ramo de usinagem.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O processo de mandrilamento utilizado na usinagem em um departamento de fabricação dos cilindros dos motores de motocicletas e as pastilhas de nitreto cúbico de boro e material cerâmico responsável pelo este processo serão os principais objetos de estudos. Assim como, o foco principal nesta monografia é a avaliação das pastilhas já mencionadas, visando melhoria sistema de produção de peças.

1.3 JUSTIFICATIVA

As indústrias precisam agir em um ciclo de melhoria a fim de manter-se competitiva no mercado em que estão inseridas. E a aplicação de estudos referentes a usinagem e pastilhas de corte são de máxima importância, tendo em vista que existe uma grande possibilidade de redução de custos e aumento na eficiência, e manter a tecnologia na usinagem exige um elevado custo, para isso, propor soluções que reduzam o impacto em perdas no processo produtivo tem grande viabilidade para melhoria.

Esse estudo tem como propósito apresentar uma correlação entre duas pastilhas de corte no processo de mandrilar, a pastilha de nitreto de boro cúbico e a pastilha de cerâmica à base de alumina, identificar qual tem maior viabilidade tratando-se de produtividade e custo com ferramentas. Serão avaliados o uso das ferramentas de corte, por meio da análise dos materiais de fabricação, tipos de ferramentas, aplicações e a variação do custo da ferramenta em relação a vida útil, com o intuito de fornecer uma produtividade eficiente com custo-benefício.

O custo de aquisição para pastilha de nitreto de boro cúbico é 20% maior que a pastilha de cerâmica à base de alumina, assim como, para essa operação existe um elevado número de setups, que geralmente ocorre quando a pastilha alcança vida útil ou deve ser retirada por determinado motivo onde o tempo para troca em média equivale a 20 minutos, por isto, gera um aumento de tempo de paradas e perda produtiva. O importante nessa pesquisa é identificar o diferencial de cada pastilha utilizada na mesma máquina mandriladora, assim como definir a mais adequada para esse processo atendendo sempre os requisitos da qualidade.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é avaliar de forma comparativa as pastilhas de corte com dois tipos de materiais de fabricação na usinagem de mandrilamento. Identificar as características predominante e quais são as principais aplicações tanto com pastilha de nitreto cúbico de boro como na pastilha de material cerâmico através da fundamentação de manuais de informações técnicas para ferramentas de corte.

A presente pesquisa tem como meta principal buscar soluções e identificar fatores que podem tornar-se pontos de melhorias dentro de uma empresa que atua no setor de duas rodas, buscando medidas e ações que possam contribuir e gerar ganho na produtividade, através do estudo de tecnologias de ferramentas de corte.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para alcançar os objetivos proposto, é necessário levar em conta os seguintes objetivos específicos para desenvolvimento do trabalho:

- Consultar manuais de informações técnicas referências para soluções de ferramentas de corte;
- Levantar bibliografias baseadas nos estudos de materiais de fabricação de pastilhas de corte e suas aplicações, delimitando o processo de mandrilamento;
- Avaliar o processo de mandrilamento e quais são as ferramentas mais indicadas para essa usinagem;
- Avaliar a característica da rugosidade, checagem dos parâmetros de corte e avaliar a vida útil de cada ferramenta;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

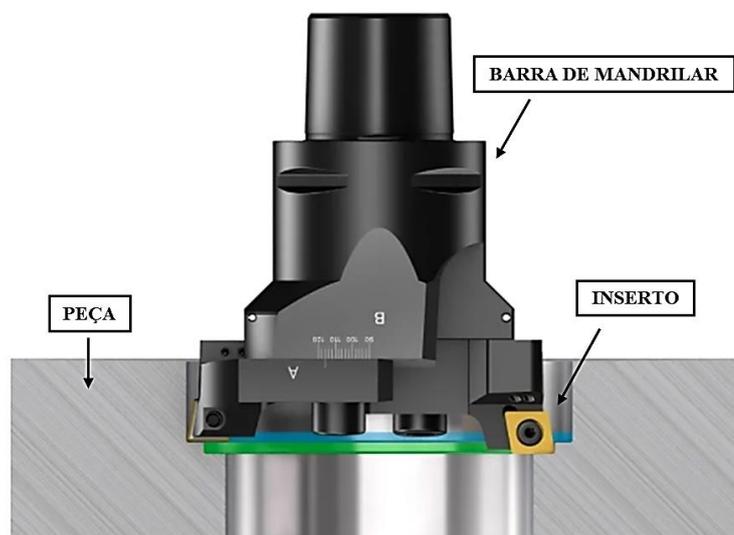
2.1 PROCESSO DE MANDRILAMENTO

O mandrilamento é um processo de usinagem destinado à obtenção de revolução com o auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Para tanto, a ferramenta tem rotação e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória determinada (FERRARESI, 1970).

O mandrilamento em desbaste é a remoção de metal e a preparação do furo para o acabamento da peça. A usinagem em desbaste é realizada para alargar um furo existente feito por métodos como pré-usinagem, fundição e forjamento. (SANDVIK, 2018).

Ferraresi (1970), classifica o mandrilamento em quatro tipos, segundo a forma da superfície de revolução ou cavidade gerada. Mandrilamento cilíndrico, a superfície usinada é cilíndrica de revolução, cujo eixo de simetria coincide com o eixo de rotação da ferramenta. Mandrilamento radial, a superfície usinada é plana e contida em um plano normal em relação ao eixo de rotação da ferramenta. Mandrilamento cônico, a superfície usinada é cônica de revolução, cujo eixo de simetria coincide com o eixo de rotação da ferramenta. Mandrilamento de superfícies especiais: processo no qual a superfície usinada é de revolução diferente das anteriores, cujo eixo de simetria coincide com o eixo de rotação da ferramenta, como por exemplo o mandrilamento esférico.

Figura 1 – Processo de mandrilamento com inserto e peça usinada



De acordo com MACHADO *et al.* (2009), a operação mostrada na Figura 1, pode ser dividida em usinagem de desbaste e acabamento. O acabamento é entendido como um processo que visa obter o tamanho final da peça ou o acabamento superficial de acordo com o especificado. A usinagem em desbaste é uma operação utilizada antes de terminar o processo acabado, visando obter a forma e o tamanho da peça próximos aos finais. (FERRARESI, 1970).

2.1.1 Evolução Histórica da Usinagem

Desde as eras pré-históricas, a ferramenta foi um dos primeiros instrumentos a ser utilizado pelo homem, sendo feitas de madeira ou pedra, eram consideradas um objeto de uso essencial de modo a contribuir na realização das tarefas durante o dia, como lavrar a terra, cortar e conformar substâncias úteis à sua vida de maneira mais eficiente e conferir-lhe maior segurança para defender-se contra o meio ambiente que lhe era, de modo geral, adverso. (FERRARESI, 1977).

Durante a Segunda Guerra Mundial, os ingleses, utilizando um novo tipo de material, que aparentemente já havia sido estudado antes na Alemanha e na União Soviética, obtiveram resultados surpreendentes na usinagem. Esse material, baseado em óxidos cerâmicos, essencialmente óxido de alumínio, permitiu velocidades de corte que ultrapassaram de muito aquelas possibilitadas pelo metal duro.

Com a chegada Revolução Industrial, novos e mais resistentes materiais apareceram, promovendo o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte. Depois, a utilização da água e do vapor como fontes de energia impulsionou a indústria metal-mecânica.

Os materiais a princípio utilizados na fabricação de máquinas a vapor eram o ferro fundido, o latão e o bronze, facilmente usinados com as ferramentas de aço-carbono temperado disponíveis na época. Ainda assim, eram necessários 27,5 dias de trabalho para mandrilhar um dos cilindros de uma máquina de grande porte (TRENT, 1985).

2.1.2 Usinabilidade dos Materiais

Pode-se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Entende-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam

seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, esforços de corte, temperatura de corte, produtividade e características do cavaco. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A usinagem consiste na remoção de material em forma de cavaco para moldar uma peça de acordo com as especificações do desenho ou projeto, sendo importante para uma ampla quantidade de processos de fabricação, basicamente vários objetos passam pelo processo de usinagem.

Nos últimos anos, a concorrência de produtividade na indústria intensificou-se, onde progressivamente exige maior desempenho de remoção de material, altas taxa de vida útil de ferramentas de corte e conseqüentemente, e dessa maneira, redução de custo nos processos. Dessa forma, a escolha da ferramenta correta é primordial para que uma empresa consiga aumentar sua produtividade.

Para Trent e Wright (2000), apesar da falta de uma medida universal, a usinabilidade pode ser avaliada pelos seguintes critérios abaixo:

Vida útil da Ferramenta: A quantidade de material removida por uma aresta de corte sob condições de corte de acordo com o especificado, antes que o desempenho da ferramenta não atenda mais as condições do processo e apresente um desgaste que pode gerar comprometer a qualidade da peça usinada.

Taxa Limite de Material Removido: Está relacionado com a taxa máxima de remoção de material durante a usinagem para determinado critério de vida útil das ferramentas.

Forças de Usinagem: Relaciona-se com as forças que atuam na ferramenta durante a remoção de material (pode-se ser medidas por um dinamômetro de acordo com a especificação) ou a potência necessária no processo.

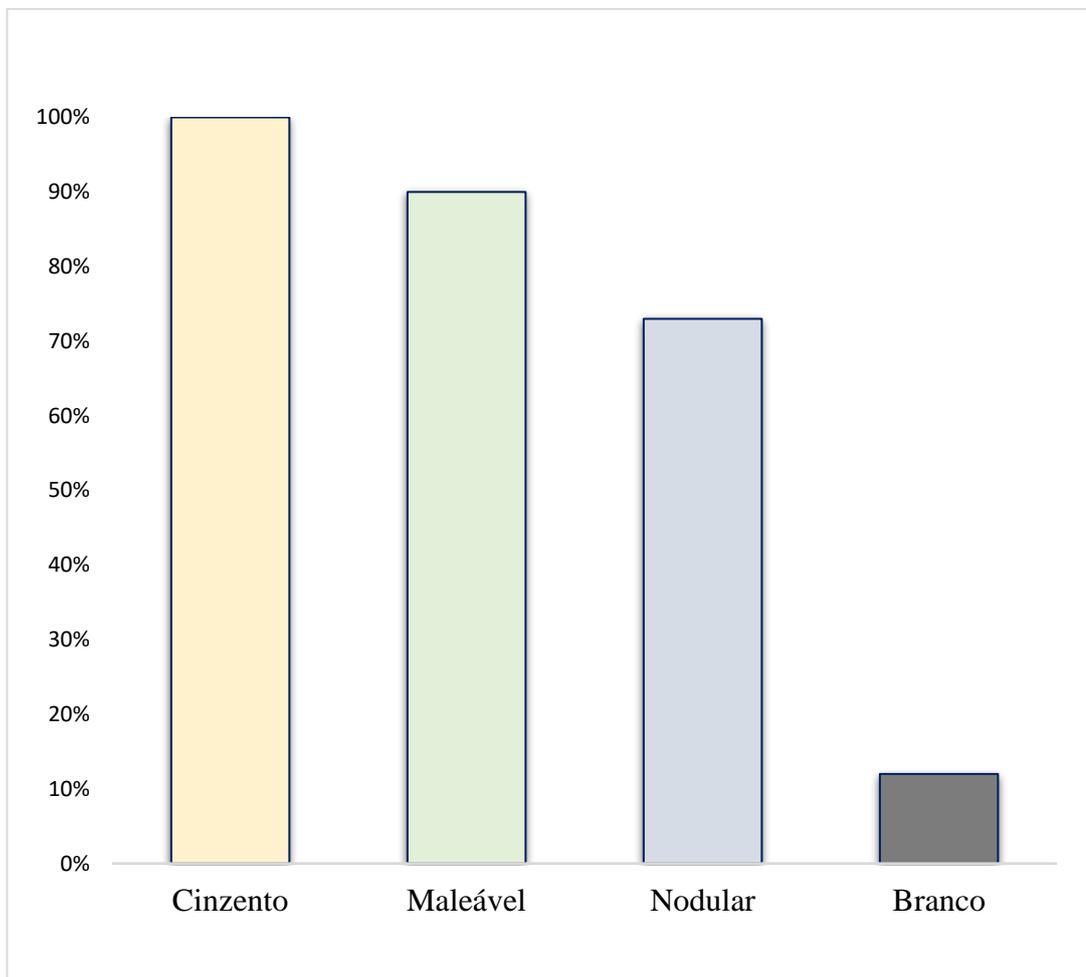
Acabamento Superficial: A superfície final adquirida sob condições de usinagem específicas.

Forma de Cavaco: A forma do cavaco influencia diretamente no escoamento do cavaco pela superfície de saída da ferramenta, sob condições de corte padronizadas.

De acordo com a Gráfico 1, é possível visualizar a usinabilidade dos ferros fundidos,

Cinzeno, Maleável, Nodular e Branco, onde observa-se que a usinabilidade variava significativamente entre as ligas, uma vez que o ferro fundido branco (com presença de carbonetos duros e abrasivos) tem uma usinabilidade de ordem 10 vezes menor que o cinzeno. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Gráfico 1 – Usinabilidade dos Ferros Fundidos



Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

Tabela 1 – Comparativo das características dos principais materiais indicados para ferramentas de corte

Materiais Duros	Dureza (HV)	Energia de Formação Livre ($\frac{Kcal}{g} \cdot atom$)	Solubilidade em Ferro (%. 1250°C)	Condutividade Térmica ($\frac{W}{m \cdot k}$)	Expansão Térmica ($\times 10^{-6}/k$)	Material da Ferramenta
<i>Diamante</i>	> 9000	-	Alta	2100	3.1	Diamante / Sinterizado
<i>CBN</i>	> 4500	-	-	1300	4.7	CBN Sinterizado
<i>Si₃N₄</i>	1600	-	-	100	3.4	Cerâmicas
<i>Al₂O₃</i>	2100	-100	$\cong 0$	29	7.8	Cerâmicas / Metal Duro sem Cobertura
<i>TiC</i>	3200	-35	< 0.5	21	7.4	Cermet / Metal Duro com Cobertura
<i>TiN</i>	2500	-50	-	29	9.4	Cermet / Metal Duro com Cobertura
<i>TaC</i>	1800	-40	0.5	21	6.3	Metal Duro sem Cobertura
<i>WC</i>	2100	-10	7	121	5.2	Metal Duro sem Cobertura

Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2015).

2.1.3 Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento é amplamente utilizado em blocos de motores, freios e outros, devido ao seu baixo custo e excelente moldabilidade, é também, um material amplamente empregado no setor automobilístico.

Ferros fundidos são ligas ferro-carbono com porcentagem de carbono entre 2 e 4%, contendo ainda outros elementos de liga como o silício, o manganês, o fósforo e o enxofre, além de níquel, cromo, molibdênio e cobre. Suas principais propriedades são a boa rigidez, resistência à compressão e relativo baixo ponto de fusão, o que possibilita a utilização da fundição como processo de fabricação de peças de ferro fundido. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

A resistência e a ductilidade são muito maiores sobre cargas de compressão, porém os ferros cinzentos são altamente eficientes no amortecimento de energia vibracional, sendo muito indicados e utilizados para aplicações expostas e vibrações, tais como as estruturas de base para máquinas e equipamentos pesados, além de exibir uma alta resistência ao desgaste.

Em termos de engenharia, sua capacidade de amortecimento é alta, o que permite a este tipo de metal largas aplicações (VAN LACK, 1984).

2.2 FERRAMENTA DE CORTE

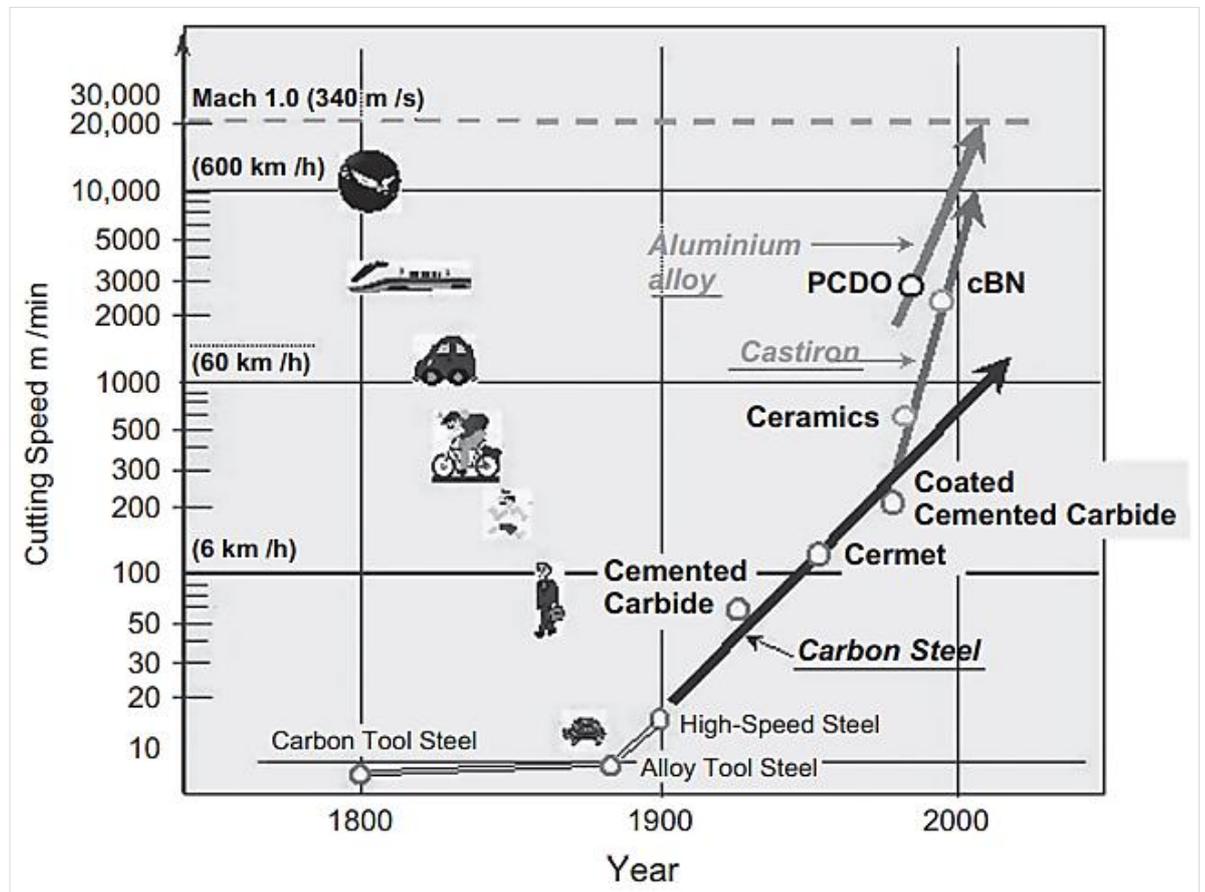
As ferramentas de pastilhas têm diversas e grandes vantagens. As pastilhas apresentam repetitividade garantida, usualmente em uma tolerância de menos de 0,001 pol. A aresta de corte cega pode ser rapidamente rotacionada para uma nova aresta ou a pastilha inteira pode ser substituída com pouquíssimas mudanças na preparação. Isso significa um mínimo de tempo perdido (não produtivo) quando a pastilha é indexada ou recolocada (FITZPATRICK, 2013).

À medida que a tecnologia das ferramentas avança, os tipos de materiais para fabricá-las também crescem, com isso, a escolha da ferramenta correta requer conhecimentos detalhas sobre os processos. É preciso conhecer o fluxo de fabricação onde a ferramenta será aplicada e compreender os fatores que podem afetar os mecanismos de desgaste, conseqüentemente, a vida útil. Devido à complexidade do processo de usinagem é muito difícil uma teoria planejada para cada material, muitas soluções práticas são fundamentadas através de experiências.

É válido ressaltar, que nem sempre o melhor material é aquele que garante uma maior vida à ferramenta de corte. Em alguns casos, confiabilidade de desempenho e a qualidade que é oferecida as peças são mais importantes, e isto é tanto mais relevante quanto maior for o custo do material da peça.

Na Figura 2, é possível observar durante os últimos anos, a variedade de ferramenta de corte disponível cresceu muito, assim como as tecnologias encontradas em sua composição, isso é resultado devido a exigência dos avanços no conceito de usinagem e para alcançar e para suprir as necessidades dos mais diversos grupos de materiais a usinar, visando sempre o aumento da produtividade e a economia no corte.

Figura 2 – Desenvolvimento de Materiais para Ferramentas de Corte



Fonte: GRZESIK (2016).

2.2.1 Materiais para ferramenta de corte em usinagem

De acordo com TRENT (2000), os materiais para ferramentas de corte disponíveis comercialmente nos dias atuais, são aqueles que provaram ser mais adequados para satisfazer as demandas colocadas sobre eles em termos de vida útil, taxa de remoção de material, acabamento superficial, capacidade de fornecer desempenho satisfatório em uma variedade de aplicações e o custo de produção das ferramentas.

2.2.2 Tipos de Insertos de Cerâmicas

As ferramentas de material cerâmico possuem características específicas e para Machado *et al.* (2009), essas propriedades que serão destacadas ajudam a identificá-las:

- São materiais refratários, capazes de suportar altas temperaturas sem perder

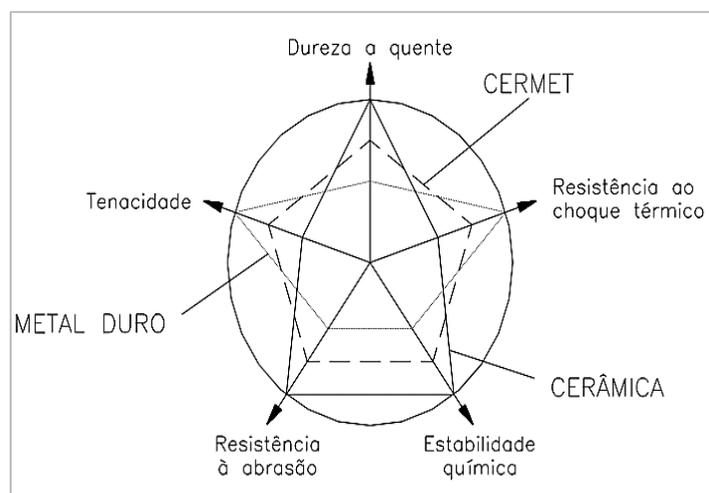
resistência mecânica;

- Possuem alta resistência ao desgaste em operações de usinagem;
- São materiais frágeis;
- Tem baixa condutividade térmica;
- Apresentam boa estabilidade química e térmica;
- Possuem boa resistência à fluência;
- Apresentam alta resistência à compressão e baixa resistência a tração.

As pastilhas de cerâmicas são indicadas para usinagem em alta velocidade por sua excepcional dureza em altas temperaturas, para usinagem de materiais endurecidos e de difícil usinabilidade, devido sua baixa interação química com a peça permite um melhor acabamento superficial e precisão na usinagem, alta resistência ao desgaste possibilita uma maior vida útil da ferramenta e excelente acabamento superficial. (CEDIFER, 2015)

Posteriormente, na Figura 3 é possível observar as características da cerâmica, em comparativo com o material metal duro e cermet, mostrando assim propriedades melhores com relação a esses dois materiais, mas também propriedades piores:

Figura 3 – Comparativo das propriedades dos materiais de cerâmica, metal duro e cermet.



Fonte: TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS (2008)

De acordo com a Figura 3, observa-se que ao comparar as características da cerâmica com o cermet e metal duro, nota-se que a dureza a quente, estabilidade química e resistência a abrasão são maiores. O metal duro por sua vez, possui maior resistência ao choque térmico e maior tenacidade. Assim como, o cermet em comparativo geralmente posiciona-se de entre as características da cerâmica e metal duro.

Tabela 2 – Aplicação de classes de ferramentas cerâmicas

CLASSES CERÂMICAS	CARACTERÍSTICAS
Cerâmicas à base de alumina (Al_2O_3)	São fabricadas com intuito de inibir trincas, gerar um material quimicamente muito estável, mas que não tem uma significativa resistência a choque térmico.
Cerâmicas Mistas	São partículas reforçadas peça adição de carbonitretos ou carbonetros cúbicos (TiC), com a finalidade de melhorar a tenacidade e a condutividade térmica.
Cerâmicas reforçadas com Whisker	Essas ferramentas usam whiskers de carboneto de silício (SiCw) com o objetivo de elevar significativamente a tenacidade e permitir o uso de refrigeração. Cerâmicas reforçadas com whiskers são ideais para usinar ligas à base de Ni.
Cerâmicas de Nitreto de Silício (Si_3N_4)	As classes de ferramentas de nitreto de silício são ótimas e indicadas em ferros fundidos, porém a baixa estabilidade química limita seu uso em outros materiais da peça.
Cerâmicas SiAlON	Esses materiais são uma combinação de uma rede auto reforçada de nitreto de silício com estabilidade química aprimorada. As classes SiAlON são indicadas para usinagem de superligas resistentes ao calor.

Fonte: ADAPTADO SANDVIK COROMANT (2018)

As ferramentas de cerâmicas podem ser subdivididas em duas características principais: Oxidas e não oxidas. A classe das cerâmicas oxidas, inclui óxido puro, óxido misto e cerâmica

reforçada com whiskers, com isso é denominada e conhecida como cerâmica à base de alumina, como material base em todos eles são óxidos de alumínio ou alumina. (KREBS, 2019).

Cerâmicas à base de Al_2O_3

Para Machado *et al* (2009), as ferramentas de cerâmicas podem ser conceituadas da seguinte forma:

Cerâmicas puras são ferramentas compostas basicamente por grãos finos de Al_2O_3 obtidos pela metalurgia do pó, com adição de MgO para suprimir o crescimento de grãos. Outros constituintes, como óxido de cromo, titânio e níquel são acrescentados com a finalidade de aumentar a resistência mecânica. Tais ferramentas possuem alto grau de dureza, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química, no entanto, exista uma baixa tenacidade.

Em consonância, as ferramentas cerâmicas a base de nitreto de silício, possui resultados satisfatórios na usinagem de ligas de níquel e ferros fundidos. No entanto, devido à grande interação com o ferro a elevadas temperaturas, essa classe não possui bons resultados na usinagem de aços.

2.2.3 Tipos de Inseto de Nitreto de Boro Cúbico (CBN)

As ferramentas produzidas com CBN têm elevada dureza e alta condutividade térmica, comparado as ferramentas de diamantes possuem uma dureza menor. São materiais fabricados sinteticamente, e para Valpassos *et al* (2007), CBN é produzido sob circunstâncias de altas temperaturas e altas pressões, comumente proveniente do nitreto hexagonal de boro.

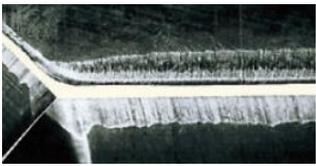
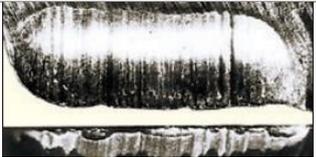
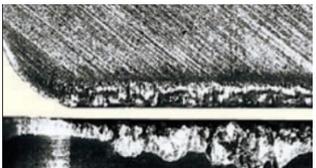
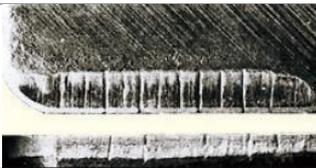
Apresentam resultados satisfatórios em condições em que é a ferramenta é altamente exigida no processo de usinagem, possuem uma resistência mecânica significativa, como por exemplos em processos de cortes são contínuos. É um material que possui um grande potencial de desenvolvimento no ramo das ferramentas de corte, uma vez que atua em conjunto com a produtividade e a alta precisão do processo.

2.3 TIPOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas de corte têm como principais funções durante a usinagem de garantir a precisão do dimensional das peças, o acabamento superficial e entregar um produto final com qualidade. Mas alguns fenômenos ocorrem durante os processos de remoção de material que

precisam ser avaliadas. Conforme a Tabela 3 é detalhado as ocorrências que podem surgir nas ferramentas durante a usinagem, ocasionando desgaste nas arestas de corte. Válido ressaltar, quanto maior a frequência de desgaste maior será a quantidade de troca de arestas, elevando o custo com consumo das ferramentas.

Tabela 3 – Tipos de desgaste e danos em uma ferramenta de corte

Forma de Dano da Ferramenta	Causa	Sugestão de Solução
Desgaste Frontal	 Classe é muito tenaz; Velocidade de corte é muito alta; Ângulo de folga é muito pequeno; Avanço é extremamente baixo.	Classe com alta resistência ao desgaste; Reduzir a velocidade de corte; Aumentar ângulo de folga; Aumentar o avanço.
Craterização	 Classe é muito tenaz; Velocidade de corte é muito alta; Avanço é muito alto.	Classe com alta resistência ao desgaste; Reduzir a velocidade de corte; Diminuir o avanço.
Micro Lascamento	 Classe é muito dura; O avanço é muito alto; É necessária uma aresta de corte mais necessária maior rigidez resistente; É de suporte e fixação.	Classe com alta tenacidade; diminuir o avanço; aumente a preparação da aresta; use um diâmetro de haste maior.
Quebras	 Classe é muito dura; O avanço é muito alto; É necessária uma aresta de corte mais resistente; É necessário maior rigidez de suporte e fixação.	Classe com alta tenacidade; Diminuir o avanço; Aumente a preparação da aresta; Use um diâmetro de haste maior.
Deformação Plástica	 Classe é muito tenaz; Velocidade de corte é muito alta; Profundidade de corte e avanço são muito grandes; Temperatura de usinagem é muito alta.	Classe com alta resistência ao desgaste; Reduzir a velocidade de corte; Diminua a profundidade de corte e avanço; Classe com alta condutividade térmica.
Aresta Postiça	 Velocidade de corte é baixa; Geometria pouco positiva; Classe não aplicável.	Aumente a velocidade de corte (Para 1045, velocidade de corte 80m/min.); aumente o ângulo de saída; Classe com baixa afinidade. (classe de cobertura e cermet)
Trincas Térmicas	 Dilatação ou contração devido à temperatura da usinagem; Classe é muito dura. (especialmente em fresamento).	Usinagem sem refrigeração. (Para usinagem com refrigeração, use fluido refrigerante em abundância.); Classe com alta tenacidade.

Entalhe		Superfícies duras ou não usinadas, peças coquilhadas e camada endurecida pela usinagem; Atrito gerado pela forma pontiaguda do cavaco (causada por pequenas vibrações).	Classe com alta resistência ao desgaste; Aumente o ângulo de saída para aumentar a agudez.
Lascamento		Aresta postiça e adesão; Expulsão de cavacos ruim.	Aumente o ângulo de saída para aumentar a agudez; Aumente o bolsão de cavacos.
Fratura por Desgaste Frontal *Dano característico de CBN e PCD		Dano devido à falta de resistência de uma aresta de corte curva.	Aumente a preparação da aresta; Classe com alta tenacidade.
Fratura por Craterização *Dano característico de CBN e PCD		Classe é muito tenaz; Esforço de usinagem é muito alto e causa alta temperatura de usinagem.	Diminua a preparação da aresta; Classe com alta resistência ao desgaste.

Fonte: Catálogo Mitsubishi Materials (2015-2016).

A usinagem forma-se a partir do contato direto da ferramenta com a peça, gerando atrito no processo, onde impacta na ferramenta devido aos esforços. Por esse motivo, pode apresentar desgaste ao longo de sua utilização, e de acordo com cada características desses desgastes torna-se possível identificar os principais tipos de avarias.

Os principais tipos de desgaste de ferramenta são: desgaste de flanco, desgaste cratera e desgaste de entalhe.

2.3.1 Desgaste de Flanco

Um dos tipos mais recorrentes é o desgaste de flanco, todo processo de usinagem gera desgaste frontal e é o principal fator que limita a vida útil das ferramentas de corte. Além de não garantir o acabamento superficial da peça e, por modificar a forma do gume original, faz com que a tolerância dimensional seja prejudicada. O desgaste de flanco ou frontal pode ser elevado conforme o aumento da velocidade de corte. (SANTOS E SALES, 2007).

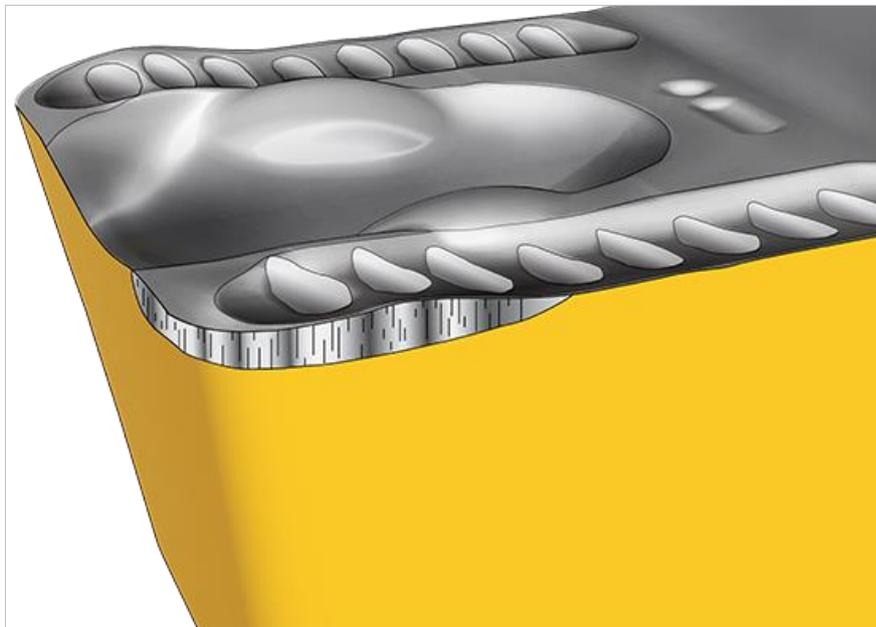
O desgaste de flanco na Figura 4 ocorre na superfície de folga das ferramentas, resultante do contato intermitente entre a peça e a ferramenta. Por isso, cada tipo de desgaste determina diretamente a vida útil da ferramenta e pode acarretar problemas na qualidade, precisão e aumento da força de corte.

Figura 4 – Tipo de Desgaste de Flanco em uma ferramenta de corte



Fonte: Sandvik Coromant (2000)

Figura 5 – Ilustração Desgaste de Flanco



Fonte: Iscar Brasil (2021)

2.3.2 Desgaste de Cratera

O desgaste de cratera em uma ferramenta de corte localiza-se na face de ataque da pastilha e acontece por causa de uma reação química entre o material da peça usinada e a

ferramenta de corte e pode ser aumentada pela velocidade de corte. (SANDVIK, 2000).

Outra característica relevante é que esse tipo de desgaste não influencia diretamente na rugosidade ou na tolerância da peça, mas sim na geometria do ângulo de saída e no comprimento de contato cavaco e peça. O crescimento do desgaste de cratera pode gerar a quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste do flanco.

Figura 6 – Tipo de desgaste de cratera em uma ferramenta de corte



Fonte: Sandvik Coromant (2000).

2.3.3 Desgaste de Entalhe

É determinado pela frequência de danos localizados na face de ataque e no flanco (área frontal) da pastilha na profundidade da linha de corte. (SANDVIK, 2018)

O local de ocorrência do desgaste de entalhe é região de interação da ferramenta, peça usinada e cavaco. Assim como outros tipos de desgaste, o aumento do entalhe pode levar ao desgaste prematuro da ferramenta e, conseqüentemente, sua quebra. Além disso, no visual de qualidade da peça, pode interferir no acabamento superficial.

Figura 7 – Tipo de desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte



Fonte: Sandvik Coromant (2000)

2.4 MECANISMO DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

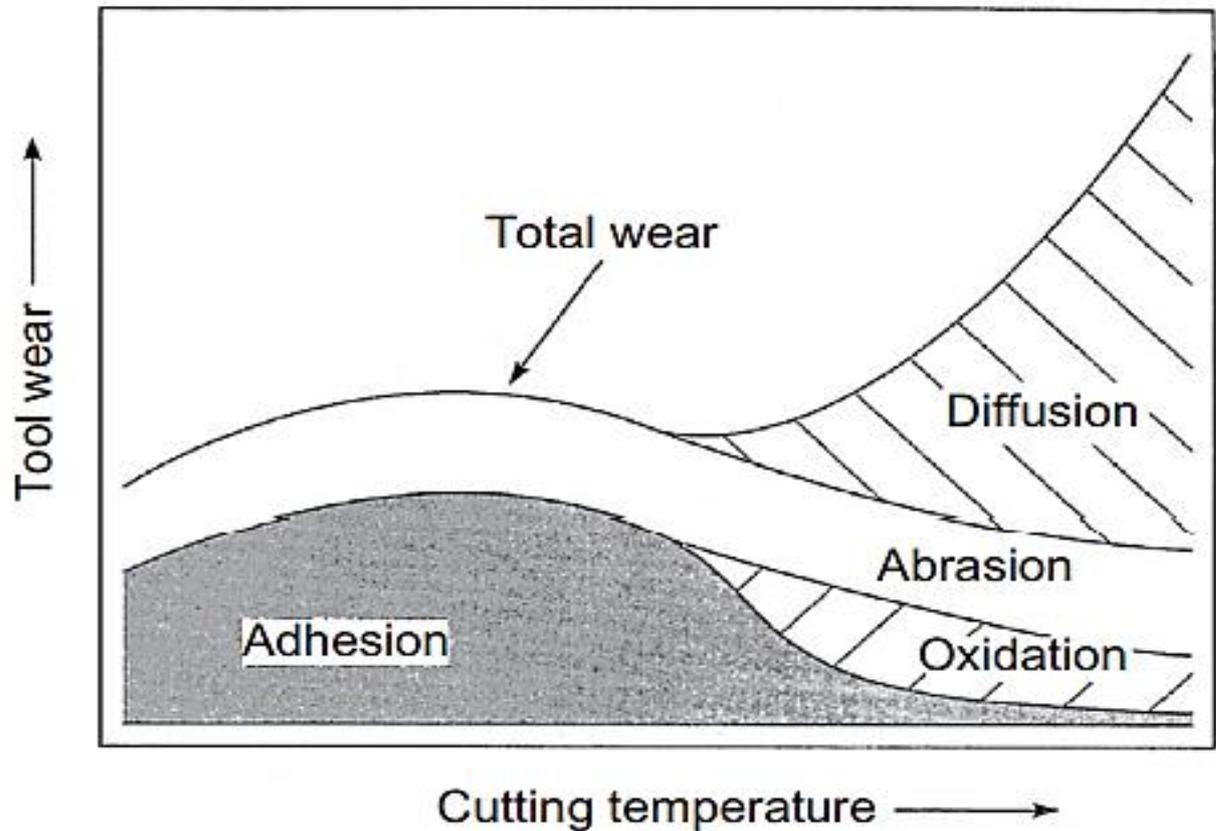
Em geral, os fatores que determinam o desgaste da ferramenta de corte podem ser classificados de forma qualitativa: mecânica, térmica e adesiva. Os tipos mecânicos de desgastes incluem abrasão, lascamento, fratura grosseira precoce e fadiga mecânica, sendo basicamente independentes da temperatura de corte. Os efeitos térmicos causam deformação plástica, difusão, corrosão e aumentam significativamente em altas temperaturas, e podem acelerar a falha da ferramenta. (GRZESIK, 2016).

O desgaste pode ser definido como a perda gradual de material pela ação mútua entre o cavaco e a ferramenta e entre a peça e a ferramenta, decorrente das solicitações mecânicas, térmicas e químicas. As principais causas de desgaste de ferramentas são citadas abaixo e representadas na Figura 8:

- Adesão
- Abrasão
- Difusão

- Oxidação

Figura 8 – Mecanismo de desgaste na usinagem em função da temperatura de corte



Fonte: WIT GRZESIK (2016).

2.4.1 Adesão

Para Machado *et al* (2009), esse tipo de mecanismo está presente em baixas velocidade de corte, quando o fluxo de material sobre a superfícies de saída torna-se irregular. Pode ocorrer o aparecimento da aresta postiça e a interação com a ferramenta torna-se menos contínua. Com essas condições, fragmentos microscópicos são arrancados das superfícies da ferramenta e arrastados junto com a fluxo de material adjacente à interface.

2.4.2 Abrasão

Este mecanismo ocorre quando partículas abrasivas ou de elevada dureza estão presentes na região de interação entre a aresta de corte da ferramenta e a peça usinada. A

resistência do mecanismo de usinagem está diretamente associada a dureza do material e seu ponto de fusão. Conforme a velocidade aumenta, a temperatura da região de formação de cavacos também tende a aumentar, em condições específicas algumas partículas de carbonetos ou carbonitreos presentes na formação de cavaco durante a usinagem desgastam a face de saída da ferramenta. O uso de materiais de ferramentas com alta condutividade térmica pode contribuir para minimizar a ação do mecanismo de desgaste abrasivo. (CERCE; PUSAVEC, 2016)

2.4.3 Difusão

A temperatura do processo de usinagem está ligada diretamente com o mecanismo de difusão, sendo definido como a transferência de átomos de um metal a outro, ou seja, entre a ferramenta e a peça. É um fenômeno de ocorre de forma microscópica e ativado pelo aumento da temperatura de corte, uma vez que a taxa de desgaste aumenta proporcionalmente com a velocidade de corte, que é um dos parâmetros de corte responsáveis pelo esforço exigido da ferramenta, portanto, a ferramenta não consegue absorver o impacto desse processo, ocasionando o mecanismo de difusão e por isso, o desgaste da cratera.

2.4.4 Oxidação

O fenômeno de oxidação, ocorre devido a presença de ar e água no processo de usinagem, em conjunto, com altas temperaturas. Alguns materiais de ferramenta que não possuem óxido de alumínio em sua composição, possuem maior facilidade para se desgastar por oxidação. E a região de desgaste gerado por esse fenômeno é nas extremidades da interação entre o cavaco e a ferramenta devido ao acesso de ar no local. (DINIZ *et al*, 2014)

2.5 IMPACTOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM

2.5.1 Velocidade de Corte

A velocidade de corte está diretamente relacionada com a vida da ferramenta, à medida que aumenta a velocidade de corte, aumenta também a temperatura, onde interfere na redução da vida da ferramenta. (MITSUBISHI, 2015). Segundo Machado *et al* (2009), “A velocidade de corte (v_c), é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte”. A equação 1 descreve a velocidade de corte.

Equação 1:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [m/min]$$

Onde:

d = diâmetro da peça ou da ferramenta (milímetros)

n = número de rotações por minutos (rpm)

2.5.2 Avanço

O avanço durante a usinagem, é o percurso do porta ferramenta por cada rotação da peça. Alguns efeitos relacionados ao avanço são: reduzir o avanço resulta em um desgaste frontal da ferramenta e diminui sua vida útil, ao aumentar o avanço resultará no aumento da temperatura e no desgaste frontal, ainda assim, o impacto na vida útil da ferramenta é menor comparado a velocidade de corte. (MITSUBISHI, 2015)

Equação 2:

$$f = \frac{l}{n} (mm/rev)$$

Onde:

l = Comprimento usinado por min (milímetros/minutos)

n = rotação do eixo principal (rpm)

2.5.3 Velocidade de Avanço

Conforme Machado *et al* (2009), “Velocidade de avanço v_f , é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido do avanço”. A equação 3 descreve a velocidade de avanço.

Equação 3:

$$v_f = f \cdot n \text{ [mm/min]}$$

Onde:

f = avanço (milímetro/revolução)

n = número de rotações por minuto (rpm)

2.5.4 Profundidade de Corte

A profundidade de corte é estabelecida através do material a ser removido, formato da peça usinada, potência e rigidez da máquina e da ferramenta. Algumas alterações na profundidade de corte podem gerar efeitos no processo, tais como: alterações na profundidade de corte não impactam significativamente na vida da ferramenta, ao diminuir a profundidade de corte resultará em fricção e usinagem da camada mais dura da peça. Assim como, ao usar materiais com superfícies brutas ou de ferro fundido, é necessário aumentar a profundidade de corte até a potência da máquina permitir, para assim evitar que impurezas e pontos de incrustação sejam usinados da camada mais dura da peça com a aresta de corte. (MITSUBISHI, 2015).

2.5.5 Rugosidade Teórica da Superfície Acabada

Geralmente, superfícies com ondulações e falhas precisam ser evitadas durante a fabricação, uma vez que se caracterizam como erros de fabricação. A rugosidade refere-se a um parâmetro especificado para cada aplicação em uma superfície a ser usinada. (MACHADO et al., 2009).

Equação 4:

$$h = \frac{f^2}{8Re} \times 1000 \text{ (um)}$$

f = Avanço por rotação (milímetros/rotação)

Re = Raio de ponta do inserto (milímetros)

3. METODOLOGIA

3.1 MÉTODO

O presente trabalho utilizará as seguintes metodologias, com foco no método dedutivo, pesquisas bibliográficas e pesquisas de campo:

Conforme GIL, (2008) “O método dedutivo, de acordo com a acepção clássica, é o método que parte do geral, e, a seguir, desce ao particular. Parte de princípios reconhecidos como verdadeiros e indiscutíveis e possibilita chegar a conclusões de maneira puramente formal, isto é, em virtude unicamente de sua lógica.

A finalidade principal do tema é a avaliação do desgaste entre duas pastilhas de corte utilizadas em um processo de mandrilamento, através da metodologia de pesquisa bibliográfica e a pesquisa em campo.

Para Lakatos e Marconi (2006) afirmam que “A pesquisa bibliográfica, ou de fonte secundária abrange toda a bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicação avulsa, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico, meios de comunicação orais”.

O tema proposto é referente a operação de mandrilamento em uma linha de produção do cilindro do motor. De início, observou-se que a linha tinha algumas perdas em com relação a sua produtividade e que um dos processos era a usinagem da camisa do cilindro, especificamente relacionado as pastilhas de corte utilizadas.

A partir dessa observação, foi feito um acompanhamento no setor produtivo para verificar quais eram as maiores dificuldades nesse processo, e logo, observou-se que um dos tipos de ferramentas utilizadas nesse processo sofria um desgaste significativo ocasionando elevado número de setup com a pastilha, já outra ferramenta que realizava o mesmo processo e não sofria elevado desgaste, com base nisso, o tema foi definido.

Com o tema definido de forma ampla, foram realizados levantamentos bibliográficos para analisar a viabilidade do tema e assim, delimitá-lo. Através de livros relacionados com usinagem e pesquisas já existentes, foi proposto os objetivos gerais e específicos sempre levando em consideração, a qualidade do processo, a produtividade da linha.

A partir das informações levantadas, tanto em forma de pesquisa como no acompanhamento produtivo, foi possível realizar a formulação do problema e buscando o desenvolvimento do trabalho através de justificativa, hipóteses do projeto de pesquisa, definição do problema, objetivos gerais, específicos e bibliografia.

Posteriormente, com o projeto definido e a área de atuação, foi feito um estudo mais detalhado sobre o tema, com artigos científicos, teses e dissertações a fim de priorizar os assuntos relevantes para o referencial teórico

Para a análise comparativa, as técnicas de avaliação previstas compreender o material a ser usinado, comportamento da rugosidade da peça, checagem dos parâmetros de corte definidos e quais são os mais indicados para a operação, acompanhamento de vida útil. Todos esses pontos citados abaixo serão relevantes para identificar qual a ferramenta adequada.

3.1.1 Material da peça usinada

A área de usinagem do processo é a camisa do cilindro, e o material a ser usinado é o ferro fundido cinzento. A peça é antes da usinagem é proveniente do processo de fundição em formato bruto com diâmetro de $\varnothing 56,04 \text{ mm}$ e após a usinagem a peça se apresenta com diâmetro de $\varnothing 57,365 \text{ mm}$.

3.1.2 Ferramentas de Corte

Realizou-se a operação de mandrilamento de desbaste e acabamento com o uso de duas pastilhas de corte de nitreto de boro cúbico (CBN) e cerâmica a base de alumina (Al_2O_3) em condições novas sendo equivalente a classe ISO K, ou seja, indicada para ferro fundido, as pastilhas eram fixadas em uma barra de mandrilar com capacidade de montagem de duas pastilhas, sendo uma para desbaste e outra para acabamento. Os formatos das pastilhas são quadrados (90°), com face plana e não possuem furo e com espessura de 3.18 mm. A pastilha de nitreto de boro cúbico é uma liga com base de C_o e possui alto teor de CBN, e contém aresta única unifacial. A pastilha de cerâmica é com base em óxido de alumínio (Al_2O_3) possui 8 arestas de corte.

3.1.3 Rugosidade

As superfícies, por mais perfeitas que seja, apresentam irregularidades que são erros de

forma e de dimensões conhecidos como macro geométricos e podem ser verificadas através de instrumentos convencionais de medição: como relógios comparadores, projetores de perfil, micrômetros, paquímetro, trenas. E erros micro geométricos conhecidos como rugosidade, caracterizado em uma superfície como um conjunto de pequenas saliências e podem ser avaliados com o uso de rugosímetro. (Faccio, 2002).

Para realização das medições da rugosidade utilizou-se o Rugosímetro da Mitutoyo Surftest SV-400, para verificar o valor da rugosidade de profundidade média R_z das peças que usinadas definindo a sequência e amostra de medição.

3.1.4 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte definidos para operação de mandrilamento foram:

- Rotação: 1400 rpm
- Velocidade de Avanço: 250 mm/min
- Avanço em (mm/rev): 0,18 mm/rev

Para melhor desempenho da ferramenta com base nos valores de rugosidade, após os testes foram definidos dois novos parâmetros para a pastilha CBN. O primeiro parâmetro definido foi através da redução da velocidade de avanço em 10%, e logo após a redução da velocidade de avanço em 20% em relação ao parâmetro original.

Parâmetro 1

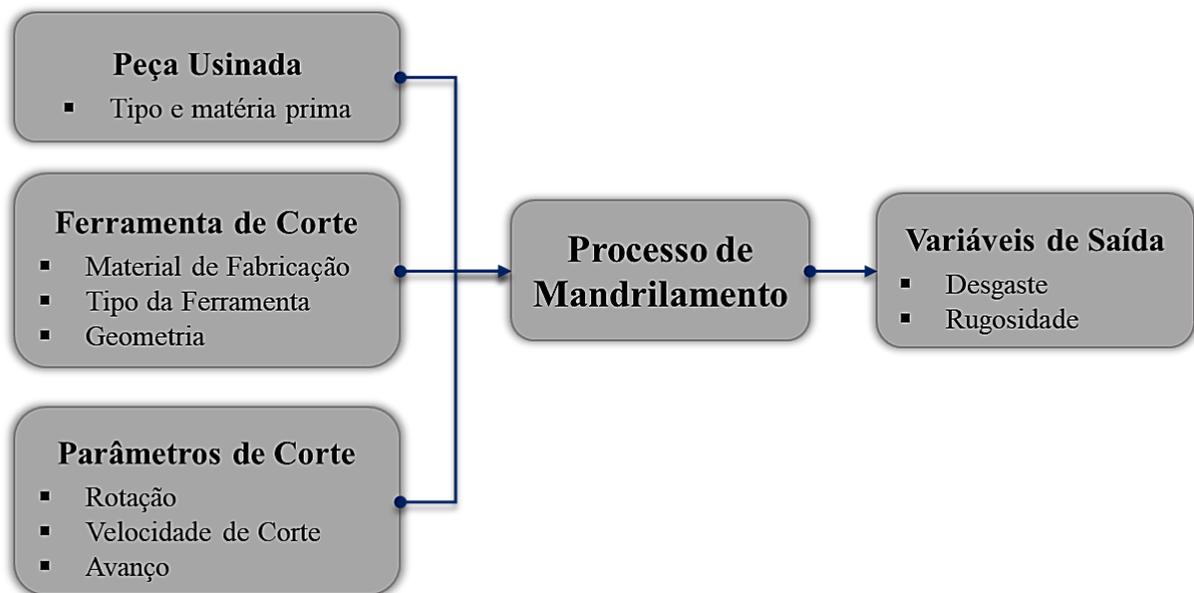
- Rotação: 1400 rpm
- Velocidade de Avanço: 225 mm/min
- Avanço em (mm/rev): 0,16 mm/rev

Parâmetro 2

- Rotação: 1400 rpm
- Velocidade de Avanço: 220 mm/min
- Avanço em (mm/rev): 0,14 mm/rev

Na figura 9, é apresentado a relação de entrada e saída referente ao processo de mandrilamento deste trabalho. As variáveis de entradas podem ser modificadas uma vez que são independentes, no entanto, ao resultado das variáveis de saída são dependentes pois dependem dos parâmetros de entrada.

Figura 9 – Relação de entrada e saída para o processo de mandrilamento



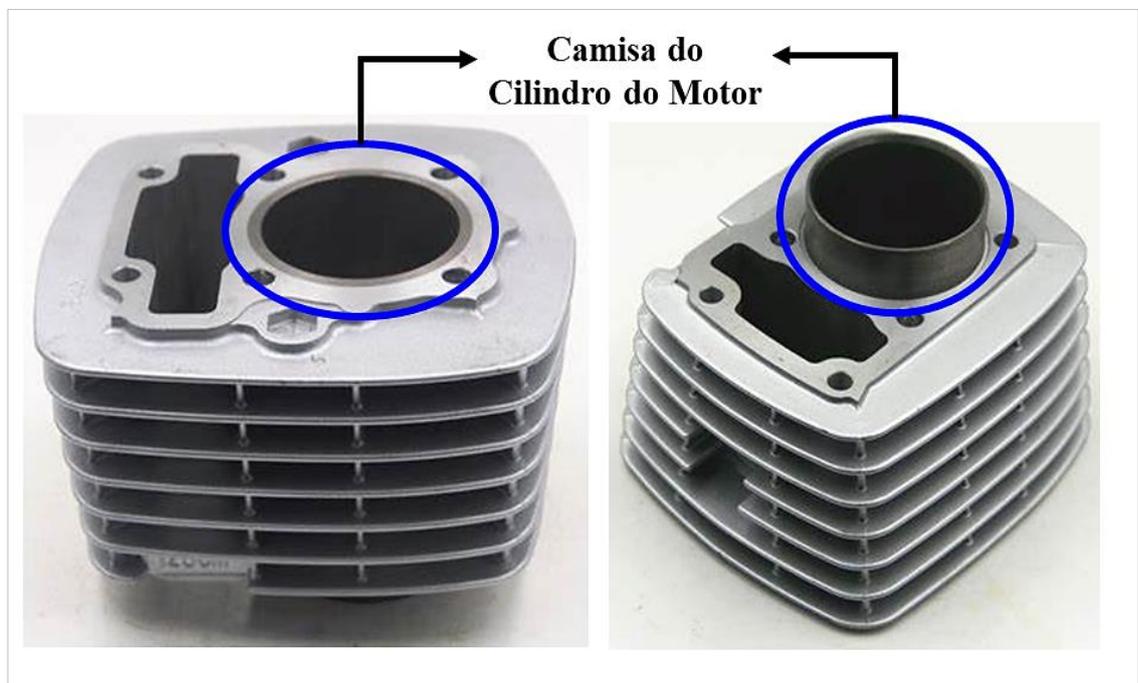
Fonte: Própria (2021)

4. APRESENTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 DETALHAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM

O processo em análise é referente a usinagem da camisa do cilindro do motor com as pastilhas de nitreto de boro cúbico e cerâmica à base de alumina. A Figura 10 apresenta o local de usinagem na área central do cilindro, a camisa, e seu material de fabricação é o ferro fundido cinzento.

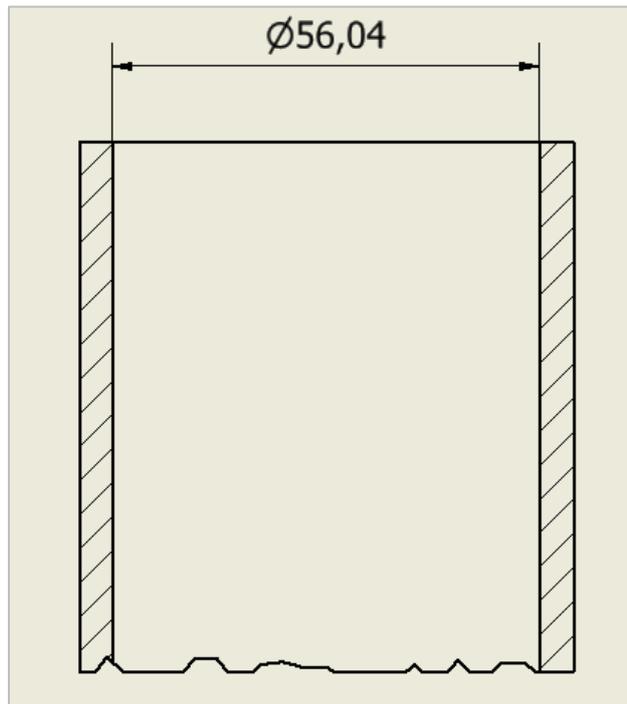
Figura 10 – Camisa do Cilindro do Motor



Fonte: Site Turning Parts..

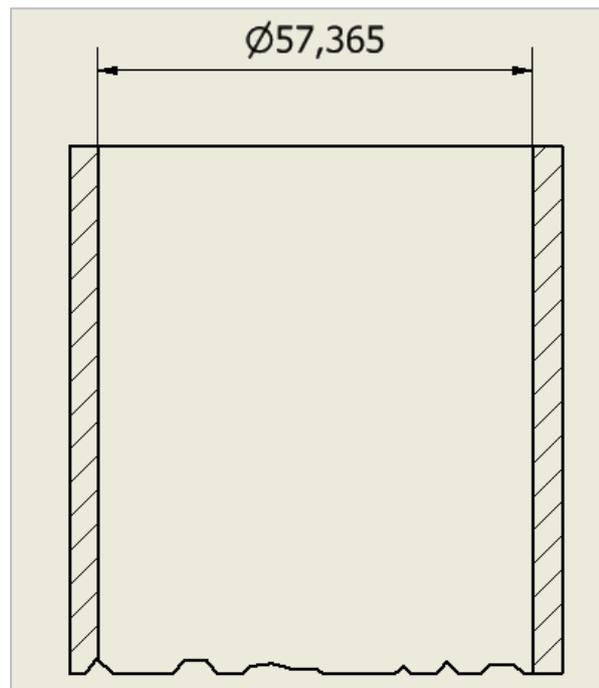
A usinagem ocorre em uma peça proveniente do processo de fundição e por isso encontra-se em estrado bruto com um furo existente. Conforme é possível visualizar na Figura 11, o diâmetro antes da usinagem é $\text{Ø}56,04$ mm. E o diâmetro após a usinagem (Figura 12), equivale a $\text{Ø}57,365$.

Figura 11 – Diâmetro da camisa do cilindro com diâmetro de $\text{Ø}56,04$ mm



Fonte: Própria (2021).

Figura 12 – Diâmetro da camisa do cilindro usinado com diâmetro de $\text{Ø}57,365$ mm



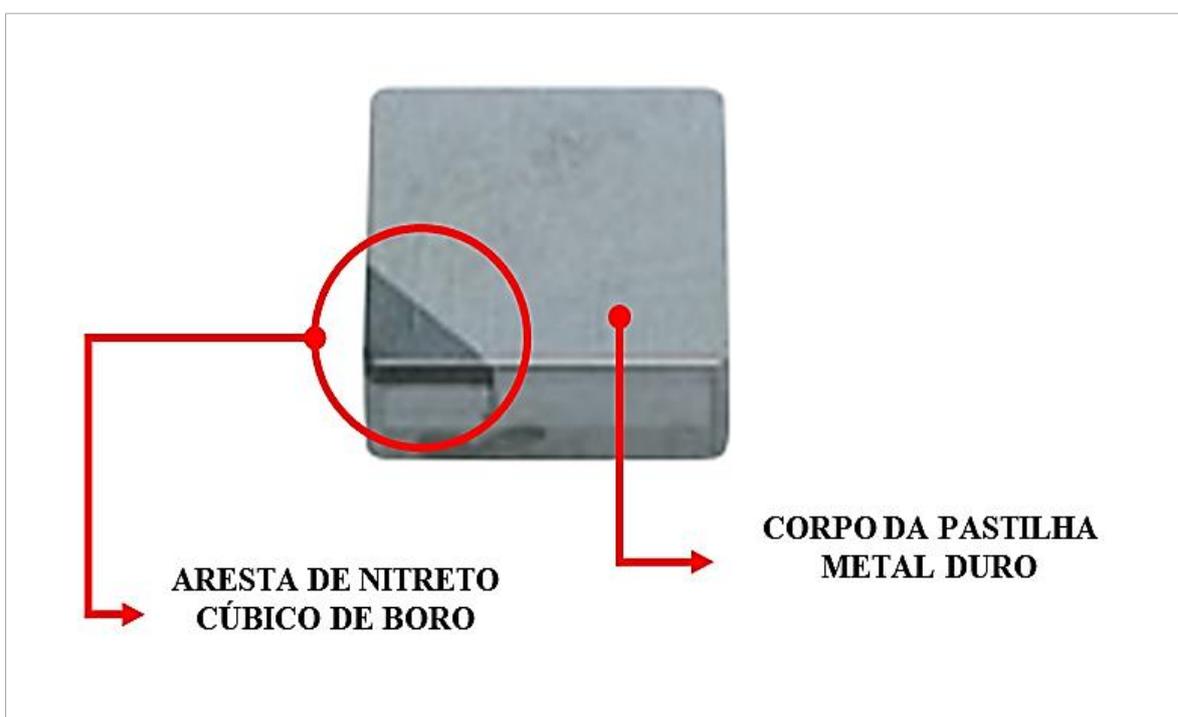
Fonte: Própria (2021).

4.2 COMPARATIVO E ESPECIFICAÇÕES DAS PASTILHAS DE CORTE

4.2.1 Especificações da pastilha de nitreto cúbico de boro (CBN)

Ferramentas de corte com CBN tem características como a dureza próxima ao diamante. É produzido a partir da mistura de CBN (Nitreto cúbico de boro) e um elemento de liga cerâmico ou metálico. O CBN possui menor afinidade com o ferro do que o diamante. A baixa afinidade e alta dureza são responsáveis pelo alto desempenho especialmente na usinagem high speed de materiais como aço endurecido e ferro fundido. (MITSUBISHI, 2015).

Figura 13 – Pastilha de corte de Nitreto Cúbico de Boro



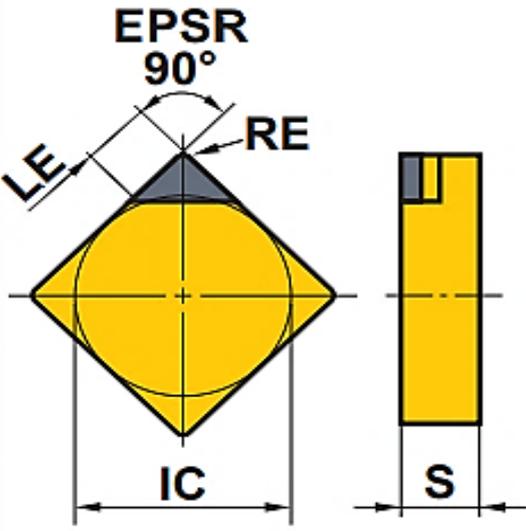
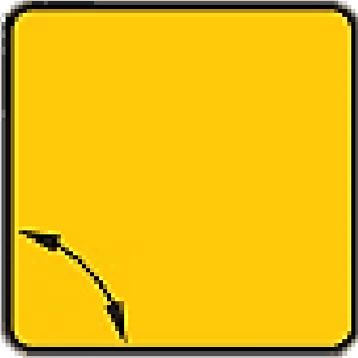
Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2020)

Conforme mostrado na Figura 13 acima, a ferramenta de corte possui dois materiais de fabricação, para a parte do corpo da ferramenta, parte não cortante, o material é o metal duro. E, para a aresta de corte, parte que entrará em contato com o material a ser usinado, é o Nitreto Cúbico de Boro, material artificial e segundo que possui maior dureza, sendo superado apenas pelo diamante.

A pastilha de corte em questão, é uma ferramenta do tipo quadrada e possui apenas uma aresta de corte conforme a Figura 14. Dessa forma, durante a usinagem no momento em que a

pastilha atinge a vida útil, ocasionando desgaste na aresta de corte e em alguns casos comprometer o acabamento superficial da peça usinada.

Figura 14 - Especificações da Ferramenta CBN

GEOMETRIA DA FERRAMENTA		TIPO DA FERRAMENTA
		
IC (mm)	9.525	
S (mm)	3.18	
RE (mm)	0.4	
LE (mm)	4.0	

Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2020)

4.2.2 Especificações da Pastilha de Cerâmica

Os inícios de testes para aplicação de ferramentas de corte de cerâmica para torneamento de ferros fundidos cinzentos foram feitos no início dos anos 1930. Com suas características, alta dureza a quente, resistência a compressão, resistência ao desgaste e inércia química das cerâmicas era considerada promissora. Contudo, na época, o difícil processo de fabricação de cerâmica combinado com máquinas ferramentas inadequadas e a falta de experiência atrasou a implementação do novo material para ferramenta de corte. (SARIN, 2014).

Segundo Machado *et al* (2009), utilizar as ferramentas cerâmicas na usinagem é importante alguns requisitos listados abaixo:

- Usar chanfros e evitar corte interrompido antes de iniciar a operação;
- O uso do fluido de corte seria evitado, se requerido, entretanto deve-se usar fluido em abundância na aresta de corte;
- Não usar aresta cortante afiada sem chanfro ou arredondamento;
- Usar arestas com raio de ponta;
- Preferir os maiores valores de v_c e de f possíveis;
- Usar um rígido sistema de fixação do inserto e um bom assentamento da pastilha no suporte;
- Usar em máquinas-ferramentas rígidas, livre de vibrações.

Figura 15 – Pastilha de cerâmica do processo de mandrilamento



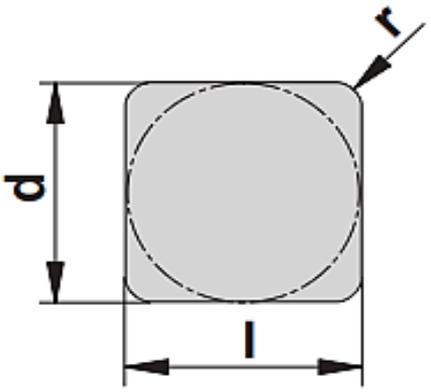
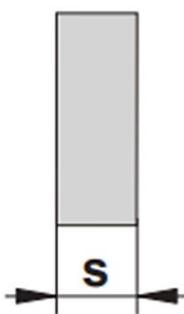
Fonte: CEDIFER (2015)

A de cerâmica da Figura 14 utilizada no processo de mandrilamento é do tipo a base de Al_2O_3 que contém adição TiC , tal adição pode conferir a matriz Al_2O_3 uma maior tenacidade e, às vezes, melhores propriedades térmicas para suportar maiores impactos mecânicos e

choques térmicos.

A pastilha tem um total de 8 arestas de corte, e na medida em que uma aresta alcança o determinado desgaste, de forma mais eficiente é possível alterar através de ajustes e prosseguir com a usinagem utilizando a mesma pastilha, esse processo pode ser repetido de acordo com a quantidade de arestas que uma pastilha possui.

Figura 16 - Especificações da Ferramenta de Cerâmica

GEOMETRIA DA FERRAMENTA		TIPO DA FERRAMENTA
		<p>QUADRADO 90°</p> 
d (mm)	9.52	
l (mm)	9.52	
r (mm)	0.4	
s (mm)	3.18	

Fonte: CEDIFER (2015)

4.3 DESEMPENHO E VIDA ÚTIL DAS PASTILHAS DE CORTE

Pastilha de Nitreto Cúbico de Boro

O principal parâmetro de checagem para verificar se a pastilha de corte atende as especificações durante a usinagem, é a rugosidade média da superfície usinada. No presente processo de usinagem, rugosidade especificada é $Rz = 12,5 \mu m$.

Destaca-se que a etapa em estudo é identificada como Mandrilamento, ou seja, desbaste

ou pré acabamento de uma peça bruta (processo primário). Posteriormente, após o Mandrilamento é realizada a usinagem conhecida como brunimento, que por fim é o processo final da peça, no entanto, não é o foco de análise desse trabalho.

Previamente, foi feito a análise da pastilha de Nitreto Cúbico de Boro juntamente com as especificações de rugosidade, que é o principal parâmetro para setup de ferramenta desse processo.

Durante o teste de usinagem com a pastilha de corte CBN, identificou-se que à medida que a rugosidade apresentava um valor próximo ao especificado representa que a ferramenta já estava no fim da vida útil (entre 300 a 350 peças), devido a esse fenômeno era necessário realizar o setup da ferramenta.

Teste – Pastilha CBN

O primeiro teste tinha como objetivo identificar os parâmetros de corte (rotação e avanço) a fim de encontrar formas para reduzir a rugosidade apresentada. No entanto, como é previsto, ao realizar alterações de parâmetros de corte em máquinas, o impacto pode ser visto em outros fatores, tempo de corte, vida útil, rugosidade e entre outros.

Parâmetros de Corte:

- Rotação: 1400 rpm
- Velocidade de Avanço: 250 mm/min
- Avanço em (mm/rev): 0,18 mm/rev

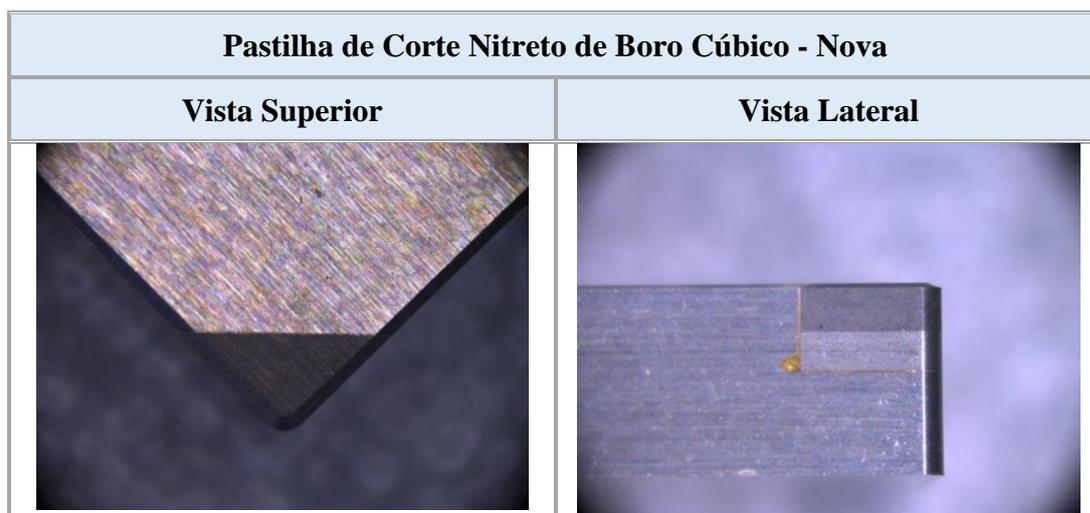
Foram realizados dois testes para análise da rugosidade da peça após a usinagem, os dois testes foram mantidos o valor de rotação e reduzidos o valor da velocidade de avanço. Na primeira alteração, foi feito a redução de 10% do valor da velocidade de avanço original. E, na segunda alteração foi realizado a alteração de 20% do valor da velocidade de avanço original. As medições dos três testes de rugosidade foram executadas na seguinte ordem, após a usinagem da peça utilizando os parâmetros originais (velocidade de avanço: 250 mm/min), posteriormente após a primeira redução (velocidade de avanço: 250mm/min) e por fim, a segunda redução (velocidade de avanço 200mm/min), em que é possível visualizar na próxima Tabela 4.

Tabela 4– Relação dos parâmetros de corte e rugosidade

Parâmetros	TESTE 1 Parâmetros Originais	TESTE 2	TESTE 3
Rotação (rpm)	1400 rpm	1400 rpm	1400 rpm
Velocidade de Avanço (mm/min)	250 mm/min	225 mm/min	200 mm/min
Avanço (mm/rev)	0,18 mm/rev	0,16 mm/rev	0,14 mm/rev
Rugosidade μm	14,5 μm	11,1 μm	10,3 μm

Na Figura 17 abaixo, observa-se a pastilha ainda não utilizada no processo de usinagem e em condição nova. É importante destacar que a pastilha possui apenas aresta única, ou seja, após alcançar a vida útil é necessário realizar o setup de uma nova pastilha. Todo setup de ferramenta é em média 20 minutos para os ajustes.

Figura 17 - Imagens da pastilha de corte CBN nova

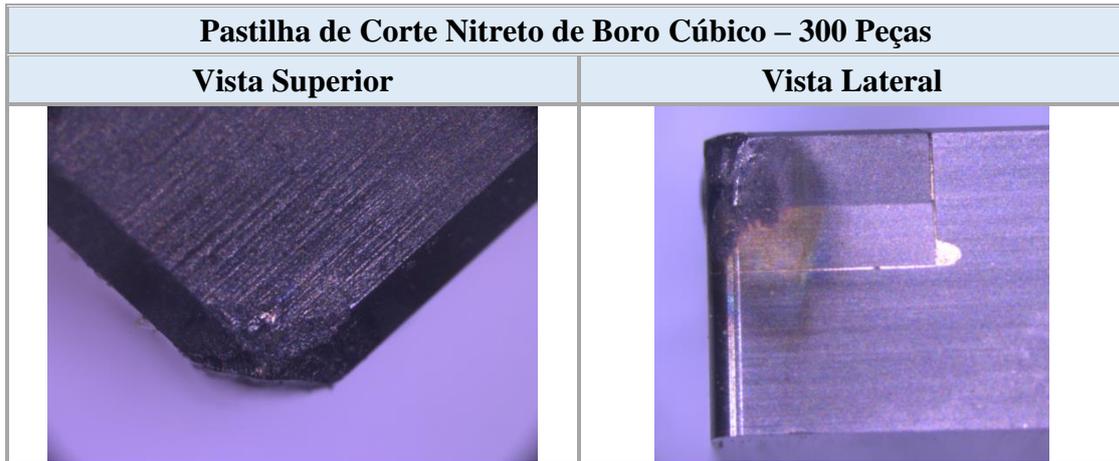


Fonte: Própria (2021)

Para avaliar a produtividade da pastilha CBN, foi levantado a quantidade de peças produzidas durante a operação. Nas condições atuais, a troca de ferramenta é determinada quando a mesma apresenta desgaste excessivo e através do limite especificado da rugosidade

da peça usinada é possível identificar a necessidade de uma nova pastilha. A figura 18 apresenta uma pastilha em condições de desgaste e com parâmetro de rugosidade próximo ao especificado (*Medição: 12.0 μm e Padrão: 12,5 μm*). Com base nisso, o total foram 300 peças produzidas.

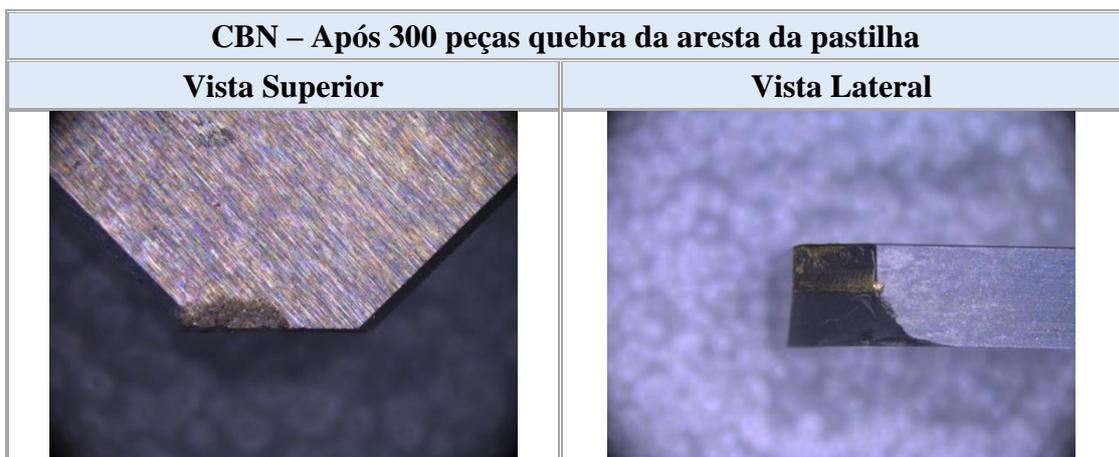
Figura 18 – Imagens da pastilha de corte CBN após usinagem de 300 peças



Fonte: Própria (2021)

A pastilha é formada por dois materiais, o corpo é fabricado de metal duro e a aresta de corte com CBN, ambos são fixados por meio de solda. Observou-se que durante o acompanhamento produtivo após a produção de 300 peças ocorreu a quebra (Figura 19) da pastilha no local da aresta de CBN.

Figura 19 – Imagens da pastilha de corte CBN após a quebra

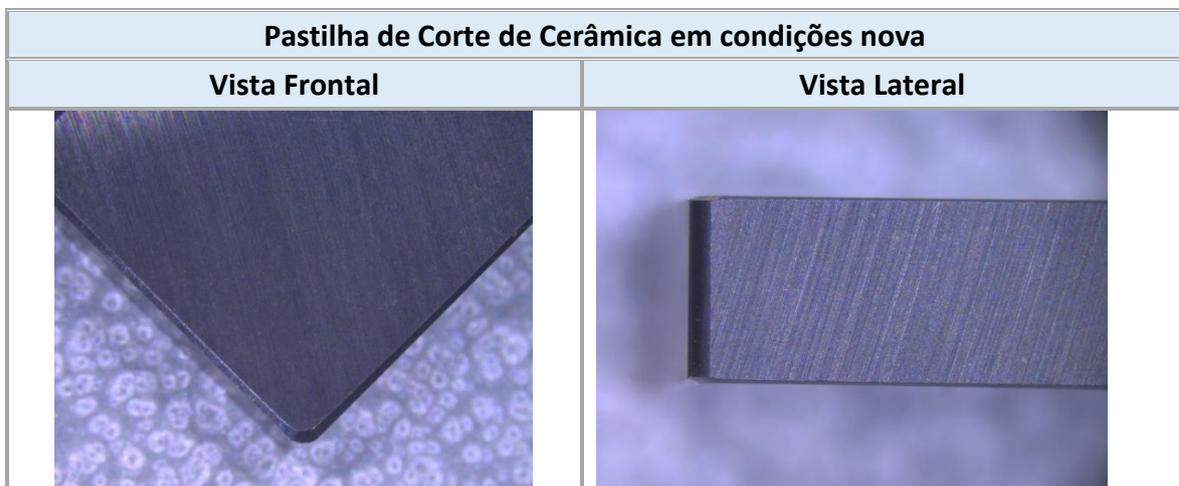


Fonte: Própria (2021)

Pastilha de Cerâmica

A pastilha representada na Figura 20, é uma pastilha de cerâmica em condição nova e que possui um diferencial com relação a pastilha de nitreto cúbico de boro, todas as 8 (oito) arestas são de corte. Por esse motivo, ao final da vida útil de determinada aresta, a troca de aresta de aresta é feita rotacionando a pastilha para outra aresta de, reduzindo o tempo de parada de máquina e produtividade por motivo de setup de ferramenta.

Figura 20 – Imagens da pastilha de corte cerâmica nova



Fonte: Própria (2021)

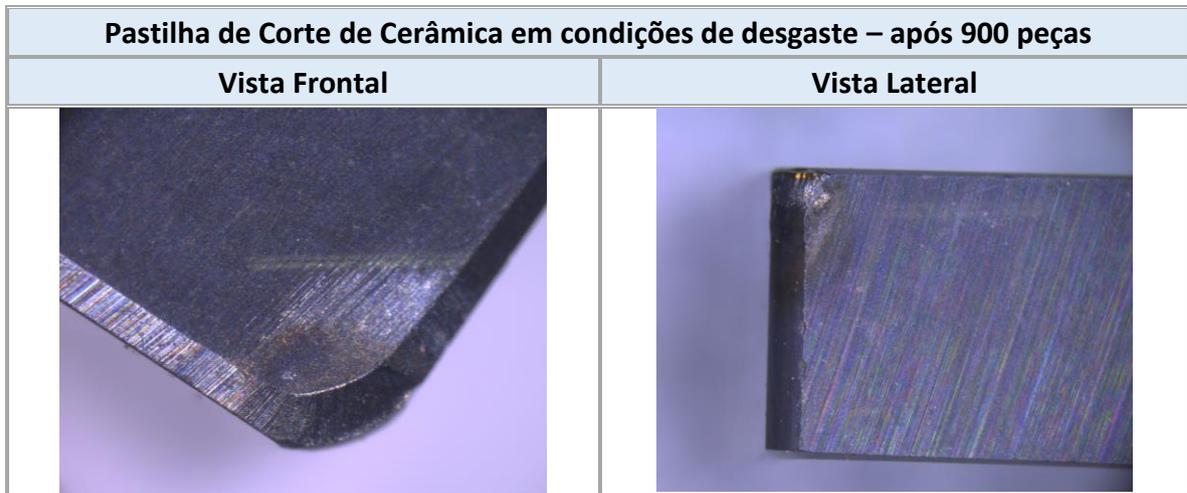
Para a produtividade da pastilha de cerâmica foram aplicadas as mesmas condições de parâmetro de corte.

Parâmetros de Corte:

- Rotação: 1400 rpm
- Velocidade de Avanço: 250 mm/min
- Avanço em (mm/rev): 0,18 mm/rev

Notou-se que a cerâmica apresentou desgaste e aumento da rugosidade após 900 peças produzidas, sendo necessário rotacionar para uma nova aresta. Em comparativo com a CBN, a cerâmica ultrapassou a quantidade de peças produzidas conforme representa a Figura 21.

Figura 21 – Imagens da pastilha de corte cerâmica após usinagem de 900 peças



Fonte: Própria (2021)

Para a determinação da quantidade de peças produzidas pela pastilha e controle de qualidade, e como teste de controle foram feitas as medições da rugosidade da peça após a usinagem, onde o intervalo de cada amostra para checagem da rugosidade eram de 100 peças (*Rugosidade Padrão $R_z = 12,5 \mu\text{m}$*).

Na tabela 5, verifica-se que nas 7 (sete) medições a rugosidade da peça atende ao padrão indicado, e na peça de número 900 observou-se que era necessário realizar a troca de aresta da ferramenta.

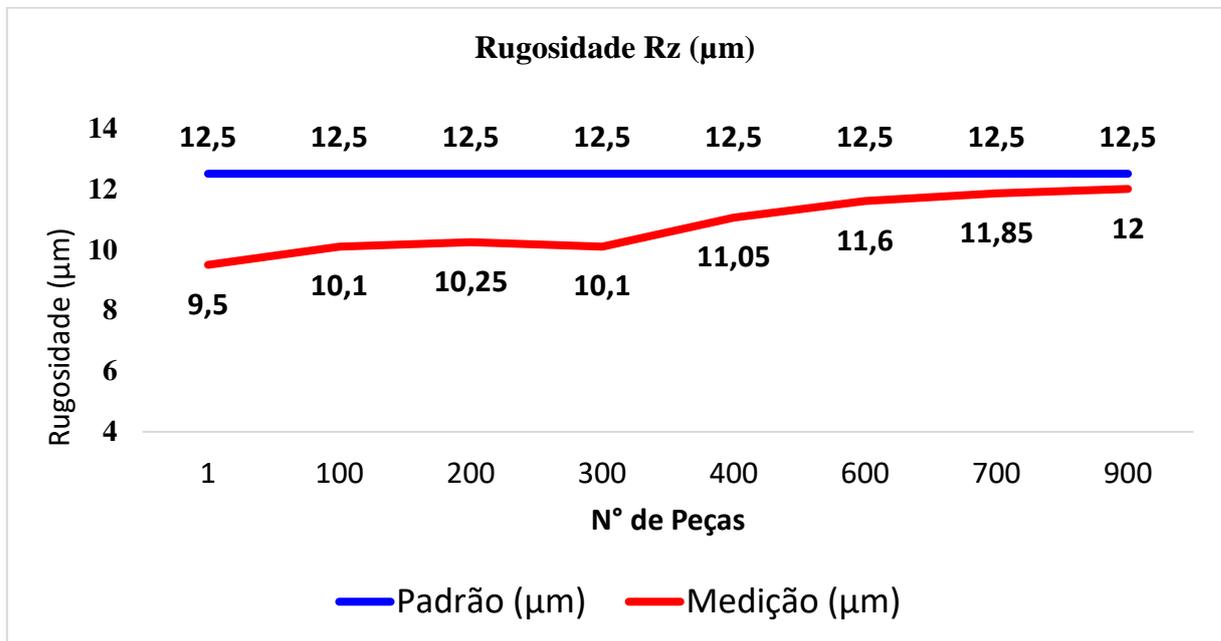
Tabela 5 – Acompanhamento de peças produzidas e rugosidade da pastilha de cerâmica

N° Peça	Rugosidade R_z (μm)							
	1	100	200	300	400	600	700	900
Padrão (μm)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Medição (μm)	9,5	10,1	10,25	10,1	11,05	11,60	11,85	12,0

Fonte: Própria (2021)

No Gráfico 2, há como visualizar o comportamento da rugosidade à medida que a quantidade de peças usinadas aumenta, e conseqüentemente, o tempo de usinagem.

Gráfico 2 – Demonstrativo entre o padrão e as medições de rugosidade das peças



Fonte: Própria (2021).

Em síntese, as duas pastilhas possuem em sua composição o material cerâmico e são indicadas para usinagem em ferro fundido. Com base nos testes, na Tabela 6 será destacado um comparativo entre as características de ambas.

Tabela 6 – Comparativo entre as pastilhas de corte

Comparativo entre as pastilhas de corte		
Características	CBN	Cerâmica
Preço	R\$ 100,00	R\$ 80,00
Quantidade de Arestas	1 aresta	8 arestas
Vida útil	300 peças	7200 peças
Classe	MB 730	W 300T

Fonte: Própria (2021)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Em referência ao comparativo das pastilhas mencionadas no presente trabalho, o principal resultado esperado é garantir a estabilidade do processo de usinagem, com o intuito de melhorar a eficiência do processo produtivo e a satisfação do colaborador responsável pela operação da máquina. O foco principal era levantar e discutir as características do processo de usinagem que foi escolhido para estudo, identificar as maiores dificuldades, as características de cada pastilha de corte utilizado para o mesmo processo. Assim como, diferenciar suas especificações e quais seriam seus pontos positivos e negativos para avaliar seu desempenho e acompanhamento de vida útil da pastilha.

Em primeiro lugar, tratando-se de custo entre as ferramentas, a pastilha de nitreto cúbico de boro (CBN) tem um custo de aquisição 20% maior (R\$ 100.00), possui apenas uma aresta de corte e quando desgastada é necessário descartar e realizar a troca por outra em condição nova, e o tempo para essa troca é em média 20 minutos, ou seja, um elevado número de setups ocasiona um maior tempo de parada de máquinas e aumenta o custo com consumo de ferramentas.

Em segundo lugar, a pastilha de cerâmica, tem um custo menor (R\$ 80.00) comparado a CBN, e base os acompanhamentos de produtividade, a pastilha alcançou um total de 900 peças produzidas por aresta e com as especificações de rugosidade garantidas, com 8 arestas de corte a vida útil total da ferramenta é 7200 peças.

De modo geral, as duas pastilhas são indicadas para usinagem em ferro fundido e possuem características que as colocam como ferramentas de alto desempenho, como a dureza, a estabilidade química e térmica, baixa interação química com a peça permitindo não interagir com o ferro fundido em determinadas temperaturas, alta resistência ao desgaste e temperaturas.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuro um estudo voltado para a redução ou eliminação de fluidos de corte. Para esse projeto, a pastilha de cerâmica pode ser indicada para avaliação, onde será possível analisar seu desempenho com e sem fluidos de corte e sua estabilização no processo. Válido destacar, que o uso da usinagem a seco em determinado processo possui resultados positivos como prevenção ambiental, saúde ocupacional e redução de custos.

REFERÊNCIAS

- CALLISTER Jr, William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 5 Ed. Rio de Janeiro: LTC,1999.
- CAMARGO, Robson de. **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Santa Bárbara d'Oeste, 2002.
- CEDIFER. Indústria e Comércio de Ferramentas para Usinagem LTDA. **Pastilhas e Ferramentas Intercambiáveis**. Catálogo. São Paulo, 2015.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2. Ed. São Paulo: Makron Books, 1986.
- DINIZ, Anselmo Eduardo.; MARCONDES, Francisco Carlos.; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9 Ed. São Paulo: Artliber, 2014.
- FACCIO, I. **Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssimas velocidades de corte**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1977.
- FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem**. 1. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. São Paulo: Editora Atlas, 2008.
- GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 Ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
- ISCAR BRASIL FERRAMENTAS DE CORTE (2021). Problemas e Soluções de Desgaste de Pastilhas de Corte. Disponível em: <<https://www.iscardobrasil.com.br/products.aspx/countryid/4/productId/12343>>. Acesso em 5 de novembro de 2021.
- JINDAL, Anil. **Analysis of Tool Wear Rate Drilling Operation using Scanning**

Electron Microscope. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2012.

KREBS, Gabriel. **Utilização de insertos de cerâmica no torneamento de desbaste da liga de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, 2019.

LAKATOS, Eva Maria.; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de Metodologia Científica. 5. Ed. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

CERVE, Luka; PUSAVEC, Franci. **Increasing machinability of grey cast iron using cubic boron nitride tools: Evaluation of wear mechanism.** Indian Journal of Engineering & Material Sciences, 2016.

MACHADO, Alisson Rocha.; ABRÃO, Alexandre Mendes.; COELHO, Reginaldo Teixeira.; DA SILVA, Márcio Bacci. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** 1. Ed. – São Paulo: Blucher, 2009.

MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Ferramentas de Corte: Torneamento, Fresamento e Furação. MMC Metal do Brasil LTDA. Bela Vista - São Paulo, 2015-2016.

NOVASKI, Olívio. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica.** São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1994.

PEREIRA, Sidnei. **Melhoria da produtividade do processo de usinagem de uniões em ferro fundido maleável preto.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

PATEL, Dhanraj.; VERMA, Rajesh. **Analysis of Drilling Tool Life.** International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. Vol. 4, 2012.

PRODANOV, Cleber Cristiano.; FREITAS, Ernane Cesar. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico.** Associação Pró-Ensino Superior em Novo Hamburgo – ASPEUR, 2013.

RAMPAZZO, Lino. **Metodologia Científica: Para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação.** São Paulo: Editor Loyola, 2005.

RODRIGUES, Alessandro Roger. **Estudo da Geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem em alta velocidade**. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2005.

SANDVIK COROMANT (2018). **Desgaste das arestas de corte**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges>>. Acesso em 10 de novembro de 2021.

SOUZA, Marcos, HAAG, Claudinei. **Estudo comparativo entre pastilhas de metal duro wiper e standard no processo de torneamento de ferro fundido nodular**. Santa Catarina: Faculdade de Tecnologia Senai Joinville, 2011.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I**. 5 Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**, 4 ed. USA: Butterworth – Heinemann, 2000.

TELES, Jose Marcelo. **Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

VAN LACK, Laurence. H. **Princípios de Ciências e Tecnologias dos Materiais**. 4° ed. Rio de Janeiro: Cmapus, 1984.

VALPASSOS, J.M.; RAMALHO, A.M.; BOBROVNITCHII, G.S.; MONTEIRO, S.N. **Sinterização de pastilhas de nitreto cúbico de boro utilizando como ligantes compostos de titânio**. Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV. Rio de Janeiro, 2007.

SARIN, Vinod K. **Comprehensive Hard Materials: Hardmetals, Ceramics and Super Hard Materials**. College of Engineering, Boston University. USA, 2014.