

**UNIVERSIDADE DE SOROCABA  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E  
AMBIENTAIS**

**WELLINGTON AIRES PINTO**

**DESENVOLVIMENTO E DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE CORTE EM  
LIGA METÁLICA MULTICOMPONENTE**

**Sorocaba/SP  
2021**

**Wellington Aires Pinto**

**DESENVOLVIMENTO E DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE CORTE EM  
LIGA METÁLICA MULTICOMPONENTE**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo

**Sorocaba/SP  
2021**

### Ficha Catalográfica

Pinto, Wellington Aires

P732d Desenvolvimento e desempenho de ferramenta de corte em liga metálica multicomponente / Wellington Aires Pinto. – 2021.

92 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo.

Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) –  
Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2021.

1. Ligas (Metalurgia). 2. Usinagem. 3. Dureza. I. Restivo, Thomaz

**Wellington Aires Pinto**

**DESENVOLVIMENTO E DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE CORTE EM  
LIGA METÁLICA MULTICOMPONENTE**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo  
Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves  
Universidade de Sorocaba

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Rossana Cristina Rossoni Figueira  
Universidade de Sorocaba

Dedico à minha família, à minha esposa Talita, meus filhos Helena e João, pela paciência, pela atenção e pelo amor que me deu ânimo para ter tantas e tantas horas de dedicação na pesquisa e nos testes práticos necessários para esta dissertação, amor esse que me fez crescer e vencer mais esta batalha. Dedico também aos meus pais, José e Angélica que me deram a vida e fizeram sempre o melhor que poderiam ter feito como pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, saúde, oportunidade e capacidade que me foi dada para concluir com êxito este trabalho.

A todos os professores que tive em minha vida e que em muito colaboraram para que eu chegasse a esta etapa, em especial ao meu orientador professor Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo pela dedicação e por ter me dado essa oportunidade de compartilhar comigo todo seu vastíssimo conhecimento na área de materiais.

A Uniso que disponibilizou seus laboratórios para que os testes pudessem ser feitos e a seus funcionários atenciosos que sempre colaboraram e em especial ao professor Me. Alexandre Belchior responsável pelo laboratório interdisciplinar da Uniso, pelo apoio dado sempre que foi necessário.

A Gerdau pela doação do material para usar.

Ao Ipen por ceder equipamentos para medições de dureza.

Ao IFSP – Instituto Federal de São Paulo pelo tempo cedido e pela bolsa parcial que ajudou a custear o mestrado.

A todos que direta ou indiretamente participaram e ajudaram nessa jornada.

A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao seu tamanho original.  
(Albert Einstein)

Uma experiência nunca é um fracasso,  
pois sempre vem demonstrar algo.  
(Thomaz Edison)

## RESUMO

Novos materiais são, constantemente, desenvolvidos para atender a aplicações que já existem e a novas aplicações. As ligas metálicas multicomponentes têm mostrado grande potencial nessa área, como a liga Diamante Metálico desenvolvida nesses últimos anos. Fonte de um trabalho árduo, pesquisadores desenvolveram configurações e composições da liga Diamante Metálico em 9 composições distintas. Para este trabalho foi escolhida a liga Diamante Metálico de número 4 devida a sua alta dureza. A fundição em formato de pastilha da liga 4 foi aocançada através do desenvolvimento de um processo de produção, cujo produto fundido foi renomeado como liga “Diamante Metálico 4C” sendo o C o processo de produção da ferramenta descrito neste trabalho. O tipo das pastilhas de torneamento produzidas utilizando a referida liga foi do tipo SNGN, quadrada, ângulo neutro e sem furo, o mesmo tipo e formato das pastilhas P10 e P30 comerciais sem coberturas de revestimento comparadas em testes. Os materiais utilizados nos testes de usinagem foram tarugos de aço ABNT SAE 8640 preparados de acordo com a norma ABNT NBR ISO 3685. Primeiramente, um pré-teste foi conduzido, levando à confirmação da qualidade da ferramenta experimental em questão. Na sequência do trabalho conduziu-se o teste final de vida das ferramentas, onde mediu-se o desgaste de flanco máximo VBmax nas 3 ferramentas como parâmetro de comparação, onde avaliou-se o comprimento de percurso torneado até a ferramenta atingir o desgaste VBmax. 0,8 mm. Comparou-se também o desgaste de flanco pelo tempo de torneamento. Como resultado do teste final de vida das ferramentas, a ferramenta experimental Diamante Metálico 4C apresentou um desgaste de flanco bem próximo da ferramenta P10, sendo o desgaste VB de 0,783 mm para a liga e 0,774 mm para o metal duro P10, ambos em comprimento de usinagem de 468 metros. O melhor resultado no desgaste de flanco do teste final de vida foi da ferramenta P30 com valor VB de 0,404 mm no comprimento de 468 metros usinados. Quanto ao teste de cratera analisado pelas imagens, não houve reação química do material usinado com a ferramenta de Diamante Metálico 4C, que apresentou desgastes de cratera suaves a uma distância razoavelmente distante da aresta de corte, o que é positivo por não comprometer o corte do desbaste do torneamento. Por fim, conclui-se que o material experimental multicomponente Diamante Metálico 4C testado tem um grande potencial para seguir adiante com pesquisas e desenvolvimento de ferramentas e tornar-se, muito em breve, uma alternativa para o torneamento na indústria, com a grande vantagem de não usar cobalto, componente muito utilizado nas ferramentas de usinagem e ferramentas de usinagem em geral.

**Palavras-Chave:** Metal duro. Desgaste de ferramenta. Liga multicomponentes.

## ABSTRACT

New materials are constantly being developed to meet existing applications and new applications. The multicomponent metallic alloys have shown great potential in this area, the Diamante Metálico alloy was developed in the last years, source of a hard work of researchers who developed configurations and compositions of the Metallic Diamond alloy in 9 different compositions. In this work, alloy number 4 was chosen due to its high hardness. In order to cast the Metallic Diamond 4 into a tablet shape, there was a need to create a production process while the best result renamed the alloy used in this work to "Metallic Diamond 4C", being C the production process of the tool described in this work. The type of turning inserts produced was the SNGN type, square, neutral angle and without hole using the referred alloy, being the same type and shape of the P10 and P30 commercial inserts without coating compared in tests. The materials used in the machining tests were ABNT SAE 8640 steel billets prepared according to the ABNT NBR ISO 3685 standard. First, a pre-test was conducted, leading to the confirmation of the quality of the referred experimental tool. Following the work, the final tool life test was conducted, where the maximum flank wear VBmax was measured. 0.8 mm in the 3 tools as a comparison parameter and evaluating the turned path length until the tool reaches the VBmax wear. 0.8 mm. Flank wear was also compared for turning time. As a result of the final tool life test, the 4C Diamond Metallic experimental tool showed a flank wear very close to the P10 tool, with the VB wear being 0.773 mm for the alloy and 0.774 mm for the carbide P10, both in length of 468 meter machining. The best result of the final life test was for the P30 tool with VB flank wear of 0.404 mm in the length of 468 meters machined. As for the crater test analyzed by the images, there was no chemical reaction of the machined material with the 4C Metallic Diamond tool, which showed smooth crater wear at a distance reasonably far from the cutting edge, which is positive because it does not compromise the cutting of the material. Finally, it can be concluded that the experimental 4C multi-component diamond material tested has a great potential to go ahead with research and tool development and become, very soon, an alternative for turning in the industry, with the great advantage of not using cobalt, a component widely employed in machining tools.

**Keywords:** Hard metal. Tool wear. Multicomponent alloy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Torno mecânico horizontal. ....	22
<b>Figura 2</b> - Alguns dos principais tipos de operações de torneamento .....	23
<b>Figura 3</b> - Eixo sendo usinado em Torno horizontal universal. ....	24
<b>Figura 4</b> - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo. ....	26
<b>Figura 5</b> - Sistema de referência da ferramenta de torno. ....	27
<b>Figura 6</b> - Representação do ângulo $\alpha$ de folga .....	28
<b>Figura 7</b> - Representação do ângulo de cunha. ....	28
<b>Figura 8</b> - Representação do ângulo de saída .....	29
<b>Figura 9</b> - Desenvolvimento de material de ferramenta de corte e velocidade de corte com o passar dos anos. ....	31
<b>Figura 10</b> - Estrutura Hexagonal Compacta para o Carbetto de tungstênio. ....	32
<b>Figura 11</b> - Representação esquemática do desgaste de flanco .....	37
<b>Figura 12</b> - O desgaste da cratera, eventualmente romperá a ponta da ferramenta. ....	38
<b>Figura 13</b> - Crateras são vistas na ponta da ferramenta. ....	38
<b>Figura 14</b> - Representação esquemática do método de faceamento de Brandsma. ....	42
<b>Figura 15</b> - Variação da constante K da fórmula de .....	44
<b>Figura 16</b> - Desgaste de flanco VB .....	45
<b>Figura 17</b> - Ferramenta com ponta de diamante soldada. ....	45
<b>Figura 18</b> - Visão geral sobre a dureza do diamante .....	46
<b>Figura 19</b> - Estrutura do grafite, do diamante e diagrama do equilíbrio grafite/diamante: ....	48
<b>Figura 20</b> - Estrutura do hBN, do cBN e diagrama do equilíbrio grafite/diamante .....	49
<b>Figura 21</b> - Classificação da dureza dos materiais nas três categorias. ....	50
<b>Figura 22</b> - Elementos do projeto de ocupação de rede: .....	52
<b>Figura 23</b> - Fluxograma do trabalho .....	59
<b>Figura 24</b> - Lingotes de titânio .....	61
<b>Figura 25</b> - Becker e prensa. ....	62
<b>Figura 26</b> - Molde e máquina de fundição. ....	62
<b>Figura 27</b> - Fluxograma das etapas de fundição. ....	63
<b>Figura 28</b> - Máquina de fundição e esquema representativo .....	63
<b>Figura 29</b> - Retífica e pastilha .....	65
<b>Figura 30</b> - Pastilhas no processo de cementação .....	65

<b>Figura 31</b> - Dimensão das pastilhas de usinagem.....	67
<b>Figura 32</b> - Suporte Para Torno tipo grampo modelo Dssnr .....	68
<b>Figura 33</b> - Teste de torneamento .....	68
<b>Figura 34</b> - Cavacos longos em forma de fita .....	77
<b>Figura 35</b> - Desgaste de cratera da pastilha P10 com 3, 6 e 9 passes de torneamento .....	78
<b>Figura 36</b> - Desgaste de cratera da pastilha P30 com 3, 6 e 9 passes.....	78
<b>Figura 37</b> - Desgaste de cratera na pastilha de Diamante metálico 0, 3, 6 e 9 passes.....	79

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Tabela com os ângulos recomendados em função do material. ....	29
<b>Tabela 2</b> - Aplicação e classificação dos materiais duros de corte.....	32
<b>Tabela 3</b> - Composição das pastilhas comerciais de metal duro .....	33
<b>Tabela 4</b> - Composição das ligas em massa (%) “Diamante Metálico 4C” .....	60
<b>Tabela 5</b> - Comparativo de Ensaio de dureza Vickers realizado em microdurômetro com Aços comerciais.....	60
<b>Tabela 6</b> - Composição química do aço liga ABNT/SAE 8640.....	67
<b>Tabela 7</b> - Medição de dureza do corpo de prova.....	71
<b>Tabela 8</b> - Dados do teste preliminar – Imagens microscópio usb, FX-500.....	72
<b>Tabela 9</b> - Dados da operação de usinagem por etapa.....	74
<b>Tabela 10</b> - Comparação das durezas das pastilhas.....	80
<b>Tabela 11</b> - Resultado das durezas pelo MEV Diamante metálico 4C.....	82
<b>Tabela 12</b> - Resultado das durezas pelo MEV P10.....	82
<b>Tabela 13</b> - Resultado das durezas pelo MEV P30.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP	Profundidade de corte
CFC	Cúbica de Face Centrada
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CS	Cúbica Simples
DM	Diamante metálico
$f$	<i>Avanço</i> [ $\frac{mm}{volta}$ ]
GPA	Giga Pascal
HBN	Nitreto de Boro
HEA	Ligas de alta entropia multicomponentes
HV	Hardness Vickers (Dureza Vickers)
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Kb	Valor da tenacidade à fratura
LAE	Ligas de Alta Entropia
Q	Taxa de remoção de material $cm^3/min$
RPM	Rotações Por Minuto
MEV	Microscópio eletrônico por varredura
M/MIN	Metro por milímetro
MPA	Mega Pascal
$N/mm^2$	Newton por milímetro quadrado
MM/REV	Milímetros por revolução
TiC	Carboneto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
WC	Carboneto de tungstênio
VB	Desgaste de flanco
Vc	Velocidade de corte (m/min.)
Vf	<i>Velocidade de avanço</i> [ $\frac{mm}{min}$ ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
<b>4.1</b>	<b>Usinagem</b> .....	<b>21</b>
4.1.1	Variáveis Envolvidas no Processo de usinagem.....	21
4.1.2	Torno mecânico e torneamento .....	22
4.1.3	Tipos de tornos .....	23
4.1.4	Parâmetros de corte utilizados no torno .....	24
4.1.5	Ferramentas para operações de usinagem. ....	26
4.1.6	Ângulo de folga $\alpha$ .....	28
4.1.7	Ângulo de cunha $\beta$ .....	28
4.1.8	Ângulo de saída $\gamma$ .....	28
4.1.9	Ângulos em função do material.....	29
<b>4.2</b>	<b>Metal duro/vídia.</b> .....	<b>29</b>
4.2.1	Cobalto: um elemento tóxico que compõe o metal duro .....	33
<b>4.3</b>	<b>Avarias, desgastes e mecanismos de desgaste das ferramentas</b> .....	<b>34</b>
4.3.1	Vida da ferramenta .....	39
4.3.2	Ensaio de usinabilidade baseado na vida da ferramenta.....	40
<b>4.4</b>	<b>Crítérios empregados no ensaio de durabilidade de ferramentas</b> .....	<b>41</b>
4.4.1	Crítérios básicos de ensaio de durabilidade:.....	41
4.4.2	Crítérios específicos de ensaio de durabilidade:.....	41
4.4.3	Método do faceamento de BRANDSMA (1936) .....	42
4.4.4	Crítério da largura da marca de desgaste do flanco:.....	44
<b>4.5</b>	<b>Ferramentas de diamante</b> .....	<b>45</b>
4.5.1	Nova liga “Diamante Metálico” .....	50
<b>4.6</b>	<b>Características de matérias-primas para usinagem.</b> .....	<b>53</b>
4.6.1	Qualidade Superficial da peça usinada e características das matérias-primas. ....	55
4.6.2	Cavacos.....	56

4.6.3	Dureza.....	57
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>58</b>
<b>5.1</b>	<b>Fluxograma da metodologia experimental.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2</b>	<b>Ferramenta de corte de “Diamante Metálico”.....</b>	<b>59</b>
5.2.1	Processo de prensagem dos multicomponentes.....	60
<b>5.3</b>	<b>Fundição da liga.....</b>	<b>62</b>
5.3.1	Ajuste do processo de fundição para o novo material “Diamante metálico”.....	64
5.3.2	Processo de fundição.....	64
<b>5.4</b>	<b>Ajuste, acabamento, polimento e cementação.....</b>	<b>64</b>
5.4.1	Cementação.....	65
<b>5.5</b>	<b>Condições do corpo de prova tarugo.....</b>	<b>66</b>
5.5.1	Condições padrão para o corpo de prova tarugo.....	66
5.5.2	Material do corpo de prova tarugo ABNT/SAE 8640.....	66
<b>5.6</b>	<b>Teste de torneamento.....</b>	<b>67</b>
<b>5.7</b>	<b>Pré-teste de viabilidade da pastilha Diamante Metálico 4C.....</b>	<b>68</b>
<b>5.8</b>	<b>Teste final: Ensaio de vida das ferramentas de corte.....</b>	<b>69</b>
5.8.1	Equipamentos utilizados.....	69
5.8.2	Materiais utilizados no torneamento.....	69
5.8.3	Normalização do tarugo.....	69
<b>5.9</b>	<b>Dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 1, durômetro Buehler 5100 series.....</b>	<b>70</b>
<b>5.10</b>	<b>Dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 2, análise das imagens com o MEV.....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>71</b>
6.1	Dureza do corpo de prova tarugo 8640.....	71
<b>6.2</b>	<b>Resultado do teste preliminar de viabilidade da pastilha Diamante Metálico 4C.....</b>	<b>72</b>
6.2.1	Resultados dos testes preliminares.....	73
<b>6.3</b>	<b>Teste final: Ensaio de vida das ferramentas de corte.....</b>	<b>73</b>
6.3.1	Teste de desgaste de flanco.....	73
6.3.2	Desgaste de profundidade de cratera.....	77
<b>6.4</b>	<b>Dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 1, durômetro Buehler 5100 series.....</b>	<b>79</b>
<b>6.5</b>	<b>Valores de medição da dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 2, análise das imagens com o MEV para conferência.....</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos primórdios da humanidade, o homem dispunha apenas do que a natureza lhe oferecia como material: troncos de madeira, pedras, ossos, barro. Esses eram empregados para produzir coisas e utilizar em suas necessidades, até que foi percebido que um mineral que continha ferro revolucionaria a fabricação de artefatos e ferramentas.

De acordo com Mendes (2009), o ferro é o mais abundante e o mais conhecido dos metais. A sua importância, na história, desde há muito foi evidenciada pela arqueologia, inclusive ao classificar como Idade do Ferro, uma determinada época da história da Humanidade. Como é conhecido, o uso do ferro seguiu-se ao do cobre e ao do bronze, embora estes metais tivessem continuado a ser usados, juntamente com aquele. Em termos cronológicos, o homem conhece as formas de tratamento do minério de ferro desde cerca de 1200 A.C. Foi no Oriente Médio que a respectiva tecnologia começou a ser usada. No Norte da Europa, a Idade do Ferro começou por volta de 700 A.C. e, na Península Ibérica, cerca de 1000-900 A.C., graças aos Celtas, tendo-se verificado a sua difusão a partir do século VII. Ao longo da Idade Média, o ferro começou a desempenhar um papel relevante, com a expansão da charrua utilizada na lavoura, e da ferradura para o cavalo, então de importância decisiva nos transportes, produção, na paz e na guerra. Ainda durante a Idade Média, o ferro continuou sendo utilizado fundamentalmente em armas, ferramentas e armaduras, ou em acessórios, como cravos, dobradiças, fechaduras. Já em 1709, no forno de Abraham Darby I, em Coalbrookdale (Grã-Bretanha), dá-se mais um passo importante, para o avanço da tecnologia do ferro: Pela primeira vez, se produzia ferro utilizando carvão mineral. Esse processo dispensava a utilização da madeira das florestas. Pode dizer-se que começava então, no que ao ferro diz respeito, a revolução industrial. Contudo, para que esta se completasse, faltava ainda a máquina a vapor, cuja patente viria a ser registada por James Watt, em 1769.

Na atualidade o setor industrial moderno dispõe de um amplo leque de novos materiais, que dia após dia vem sendo melhorado e novos materiais vêm sendo desenvolvidos.

Os materiais competem entre si por mercados novos e por aqueles já existentes. Depois de certo tempo muitos fatores emergem e tornam possível a substituição de um material por outro em certas aplicações. O custo certamente é um fator. Se um avanço marcante ocorre no processamento de um material de maneira a reduzir substancialmente o seu custo, este material poderá substituir algum outro em determinadas aplicações. Outro fator que leva a substituição de material é o desenvolvimento de novos materiais com propriedades específicas para certas aplicações. Consequentemente, à medida que

o tempo passa, varia o uso que se faz dos diversos materiais. (SMITH; HASHEM, 2010, p.10).

Alguns dos materiais utilizados nas pastilhas de tornos e fresadoras são: aço carbono, com teores de carbono entre 0,7 e 1,5 % que é utilizado em pastilhas para usinagem em máquina ferramenta; aço rápido ou liga de aço composta por 0,67 a 1,3 % carbono, 5 a 12 % cobalto, 3,75 a 4,5 % cromo, 4 a 9 % molibdênio, 2 a 20 % tungstênio, 1 a 5 % vanádio e apropriado tratamento térmico; cerâmica, onde processo de fabricação deste material é a sinterização (COELHO; SILVA, 2018).

Na fabricação de pastilhas de corte destacam-se também as pastilhas produzidas em metal duro. Estas se caracterizam por apresentar elevada dureza e resistência mecânica, compostas de partículas de carbeto com grandeza micrométrica, envolvidos por um elemento metálico ligante, em geral o cobalto (Co). São fabricadas por tecnologia da metalurgia do pó, pelo processo de sinterização dos pós de carbeto e do metal, em faixas de temperaturas entre 1300 e 1500 °C. Tratamentos superficiais são sugeridos para aumentar a dureza de peças e ferramentas empregadas na indústria, com intuito de otimizar as características físicas dos materiais, ao mesmo tempo em que mantêm um núcleo relativamente tenaz. Esta combinação de resultados pode melhorar a resistência ao desgaste abrasivo das brocas (PEREIRA LEANDRO; VERNEY, 2018).

A ferramenta ideal seria aquela que alia tenacidade e dureza. Porém, ao aumentarmos uma das propriedades temos a redução da outra, ou seja, ferramentas de elevada dureza possuem baixa tenacidade e ferramentas capazes de absorver impactos possuem, geralmente, menores durezas.

Beccari (2019); Guisard Restivo (2020), afirmam que um grande número de materiais duros foi desenvolvido em todo o mundo para várias aplicações onde os componentes devem apresentar baixo desgaste, alta resistência e resistência a altas temperaturas. Também descrevem que, desde a antiguidade, a obtenção de ligas utiliza um ou dois metais base com adições de outros elementos para obter propriedades de resistência, dureza e conformabilidade.

Além disso, à medida que as aplicações se tornam mais desafiadoras com o desenvolvimento de novos materiais difíceis de usar, há também uma necessidade crescente de reduzir os custos de usinagem, aumentar a eficiência e obter desempenho superior de acabamento de superfície para componentes aeroespaciais e automotivos, sendo necessário criar novas ferramentas a partir de ligas de super e ultra dureza (KANYANTA, 2016). Não bastasse, o cobalto, componente do metal duro, além de tóxico, tem sua produção dominada em

mais da metade pela República Democrática do Congo (RDC) com minas artesanais ou de pequena escala, ligados a abusos de direitos humanos e a trabalho escravo infantil (GALANTICH, 2019).

Visto esse contexto, este trabalho buscou, a partir da construção de uma pastilha de torneamento por fundição, baseada em uma liga multicomponentes denominada “Diamante Metálico 4C”, comparar a eficiência de usinagem entre a pastilha de “Diamante Metálico 4C” e outras duas pastilhas de torneamento comerciais com as mesmas dimensões e características normatizadas para teste de ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento (ABNT NBR ISO 3685). Por se tratar de um estudo do comportamento de um novo material metálico a partir de testes, pretende-se com esse estudo, indicar a possibilidade da utilização de novas pastilhas de usinagem a partir desse novo material, o Diamante Metálico 4C.

## **2 JUSTIFICATIVA**

Os processos de usinagem baseiam-se na retirada de material por meio de uma ferramenta de corte, corte esse possível devido a dureza da ferramenta ser maior que a dureza da peça em fabricação. Visto isso, frente ao desenvolvimento de novas ligas com propriedades mecânicas e durezas cada vez mais elevadas, cria-se uma demanda constante por novos materiais de ferramenta, com a busca de propriedades cada vez mais tecnologicamente desenvolvidas, sendo mais produtivas, mais rentáveis para a empresa e proporcionando um acabamento superficial melhor na peça acabada. Uma ferramenta metálica pode ser uma alternativa ao metal duro, que é um composto cerâmica-metal, desde que possua dureza e tenacidade semelhante. O trabalho justifica-se, portanto, por apresentar uma nova liga metálica com potencial para substituição de metais duros em ferramentas de processos de usinagem.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial de uso da liga multicomponentes Diamante Metálico 4C como ferramenta de corte para usinagem de metais.

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Produzir uma pastilha experimental para torneamento cilíndrico externo, utilizando como componente principal de corte e remoção de cavaco o material ultraduro de liga multicomponentes Diamante Metálico 4C.
2. Avaliar o desempenho da liga metálica multicomponente Diamante Metálico 4C em processos de torneamento, bem como o ensaio de vida de ferramenta e comparação com outras ferramentas de metal duro.

#### 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Revisão bibliográfica é a parte do projeto de pesquisa que revela explicitamente o universo de contribuições científicas de autores com articulações das ideias dos mesmos (SANTOS; CANDELORO, 2006).

Para este trabalho, a revisão bibliográfica está estruturada abordando os assuntos, nesta sequência e forma;

- a) A usinagem; salienta o conceito das variáveis de usinagem, máquinas, parâmetros de usinagem, ferramentas e ângulos de corte das ferramentas de usinagem.
- b) O metal duro/vídia; indica as suas particularidades, dureza, estrutura e composição.
- c) Avarias e desgastes; estudos da vida da ferramenta, ensaio de usinabilidade baseado na vida da ferramenta.
- d) Critérios empregados nos ensaios de durabilidade das ferramentas; demonstra os diversos critérios de ensaio que podem ser aplicados.
- e) Nova liga Diamante Metálico 4C; denota o desenvolvimento da liga multicomponentes, elementos da composição, configuração da liga, átomos.
- f) Características de matérias-primas para usinagem; aspectos da qualidade superficial da peça usinada e características das matérias-primas.

## 4.1 Usinagem

Usinagem é um conjunto de processos de manufatura nos quais uma ferramenta de corte é usada para remover excesso de material, chamado de cavaco, de tal maneira que o material remanescente tenha a forma da peça projetada (FERRARESI, 2018; KIMINAMI *et al*, 2013). A ação predominante na usinagem envolve deformação por cisalhamento do material para formar um cavaco; à medida que o cavaco é removido e toma forma, uma nova superfície é formada e pode ser dividida em: processos de corte que geralmente envolvem ferramentas mono e multicortantes (torneamento, furação, fresamento, corte por serra, aplainamento entre outros), processos abrasivos (retificação, usinagem ultrassônica e outros) e processos avançados de usinagem, que usam fontes de energia elétrica, química, térmica, hidrodinâmica, além de uma combinação dessas para remover o material da peça (eletroerosão, feixe de elétrons, usinagem eletroquímica, corte com jato d'água, entre outros), (KIMINAMI *et al*, 2013).

### 4.1.1 Variáveis Envolvidas no Processo de usinagem

Nos processos de corte, as **variáveis independentes envolvidas e que podem ser controladas são**: tipo de ferramenta de corte (com as suas propriedades, forma, acabamento superficial), o material a ser usinado (com as suas propriedades e temperatura em que será usinado), tipo de fluido de corte e condições de corte (como velocidade da ferramenta em relação à superfície da peça, velocidade de avanço, quantidade de material removido por ciclo profundidade de corte e velocidade de repetição do ciclo de corte). **As variáveis dependentes envolvidas nos processos de corte**, influenciadas pelas alterações das variáveis independentes são: tipos de cavaco formado, força requerida e energia dissipada, aumento da temperatura da peça, da ferramenta e do cavaco, desgaste da ferramenta, acabamento superficial e integridade da superfície. Na usinagem, o acabamento superficial influencia tanto a precisão dimensional quanto algumas propriedades da peça, especialmente a resistência à fadiga. Já a integridade da superfície é influenciada pela temperatura alcançada durante a usinagem, tensão residual, transformações metalúrgicas ocorridas, deformação plástica e formação de trincas (KIMINAMI *et al*, 2013).

A usinagem é um importante processo de manufatura que pode ser aplicado a diversos tipos de materiais como: metais, polímeros, madeiras e etc. A usinagem é bastante presente em indústrias de todos os segmentos, principalmente o de metal mecânica. Novas tecnologias que proporcionem melhores resultados são sempre bem-vindas nesse segmento.

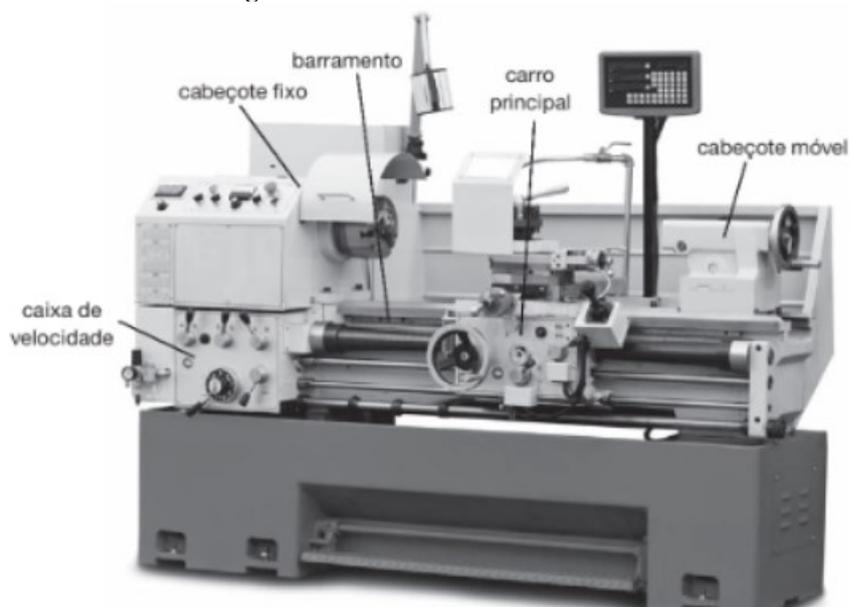
#### 4.1.2 Torno mecânico e torneamento

O torno mecânico é uma máquina ferramenta que permite usinar peças de forma geométrica. Foi aperfeiçoado por Henry Maudslay, um inventor inglês, e é utilizado desde o século XVI na Europa (S. MAGI, 2019).

Torneamento é o processo de usinagem usado para fabricar peças cilíndricas, no qual a ferramenta desenvolve um deslocamento linear, enquanto a peça exerce um movimento rotacional.

Através do torno mecânico é possível fabricar eixos, polias, pinos, qualquer tipo de roscas, peças cilíndricas internas e externas, além de cones e esferas dos mais diversos formatos.

**Figura 1** - Torno mecânico horizontal.



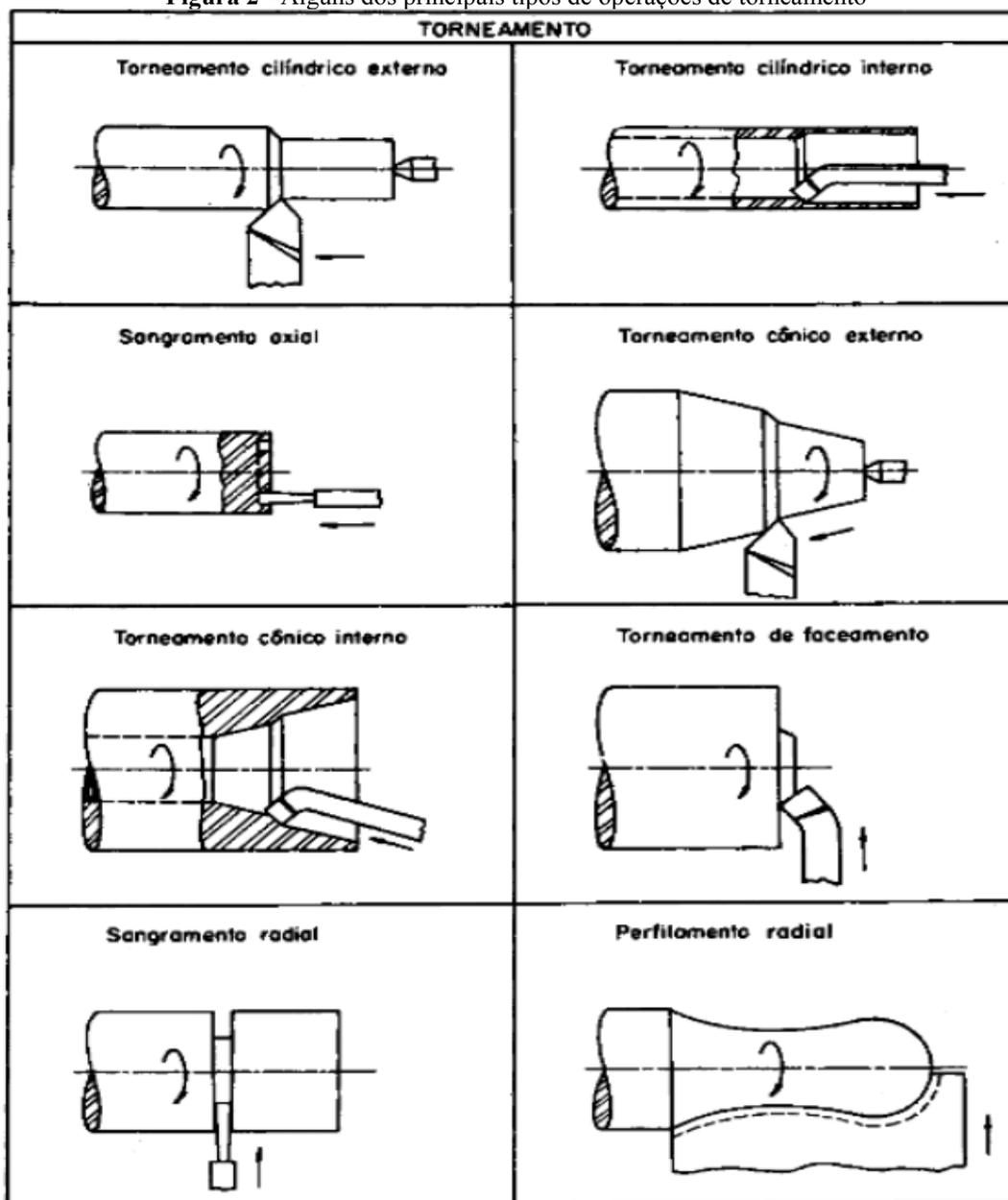
Fonte: (REBEYKA, 2016)

Pode-se observar na Figura 1 um torno horizontal universal, o cabeçote fixo, que efetua o movimento de giro da matéria-prima da peça presa na máquina. Uma correia transmite o movimento do motor até o cabeçote fixo, enquanto uma caixa de velocidades permite a regulagem da rotação do cabeçote fixo. O carro principal efetua o movimento da ferramenta em um plano de trabalho horizontal que passa pelo eixo de rotação da peça com um barramento que serve de guia para os deslocamentos do carro principal. Permite o desbaste e o acabamento de peças cilíndricas, sendo que a peça gira e a ferramenta se desloca no sentido horizontal. O movimento relativo entre a peça e a ferramenta com o contato entre a aresta de corte da

ferramenta e o material fixado na placa de três castanhas do torno gera a remoção de cavaco e consequentemente à usinagem (REBEYKA, 2016).

FERRARESI (2018), define torneamento como sendo um processo mecânico de usinagem para obter superfícies de revolução utilizando uma ou mais ferramentas monocortantes.

Figura 2 - Alguns dos principais tipos de operações de torneamento



Fonte: (FERRARESI, 2018) Adaptado

#### 4.1.3 Tipos de tornos

Conforme relata Almeida (2018), existem vários tipos de tornos:

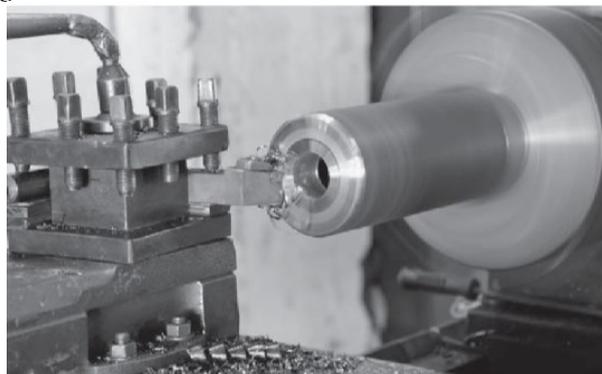
Torno Horizontal Universal: Usado para várias funções, principalmente em peças de pequeno diâmetro e grande comprimento.

Torno CNC: Máquina na qual o processo de usinagem é feito por comando numérico computadorizado (CNC) através de coordenadas X (vertical) e Z (longitudinal). Sua grande vantagem em relação ao torno mecânico é o acabamento e o tempo de produção.

Torno revólver: Torno que tem como característica a fabricação em série de peças com auxílio do cabeçote móvel que vem adaptado a várias ferramentas diferentes para executar processos de usinagem com rapidez, em peças pequenas (exemplo: buchas).

Torno vertical: Usado para trabalhar com peças com um diâmetro elevado.

**Figura 3** - Eixo sendo usinado em Torno horizontal universal.



Fonte: (REBEYKA, 2016)

#### **4.1.4 Parâmetros de corte utilizados no torno**

Os parâmetros de corte são grandezas numéricas que definem na usinagem, os diferentes esforços, velocidades, etc. a serem empregados. Os parâmetros de corte nos auxiliam na obtenção de uma melhor usinabilidade dos materiais (DINIZ *et al.*, 2006).

Análises criteriosas devem ser feitas a respeito de aumentos na produção e custos por peça usinada (FERRARESI, 2018). Dada a importância da utilização correta dos parâmetros de corte, diversas técnicas podem ser executadas com o objetivo de avaliar qualitativa e quantitativamente a influência de uma operação de usinagem, ou ainda, os parâmetros de corte sobre as propriedades de desempenho a serviço do componente acabado. Tais técnicas podem ser destrutivas e não destrutivas, algumas de fácil execução e baixo custo (como inspeção visual por microscopia, medição de dureza entre outros), enquanto outras não são tão simples e dispendiosas (difractometria por raio X, ensaios de fadiga), (MACHADO *et al.*, 2009).

Em relação aos parâmetros de corte, Diniz *et al.* (2006) cita como mais importante o avanço, sendo este usado para a determinação teórica da rugosidade média. Quanto à

profundidade de corte, esta não apresenta grande influência na rugosidade, somente quando as profundidades de corte forem superiores a 1mm, podendo ocorrer um pequeno decréscimo na rugosidade.

A velocidade de corte é uma grandeza diretamente proporcional ao diâmetro e a rotação da árvore, dada pela equação:

$$Vc = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$Vc$  = velocidade de corte (m/min.);

$D$  = diâmetro (mm);

$N$  = Rotação na árvore.

E a partir da  $Vc$ , a rotação é dada pela equação a seguir:

$$N = \frac{Vc \cdot 1000}{\pi \cdot D} \left[ \frac{m}{min} \right] \quad \text{Equação 2}$$

O avanço ( $f$ ) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, dada pelo produto do avanço.

$$Vf = f \cdot N = \frac{1000 \cdot Vc}{\pi \cdot D} \cdot f \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$f$  = avanço  $\left[ \frac{mm}{volta} \right]$

$Vf$  = velocidade de avanço  $\left[ \frac{mm}{min} \right]$

$Q$  = taxa de remoção de material

A profundidade de corte ( $ap$ ) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e  $Vc$  da ferramenta. A partir destes três parâmetros é possível determinar a taxa de remoção de material (equação 1), parâmetro usado para a medição da eficiência da operação.

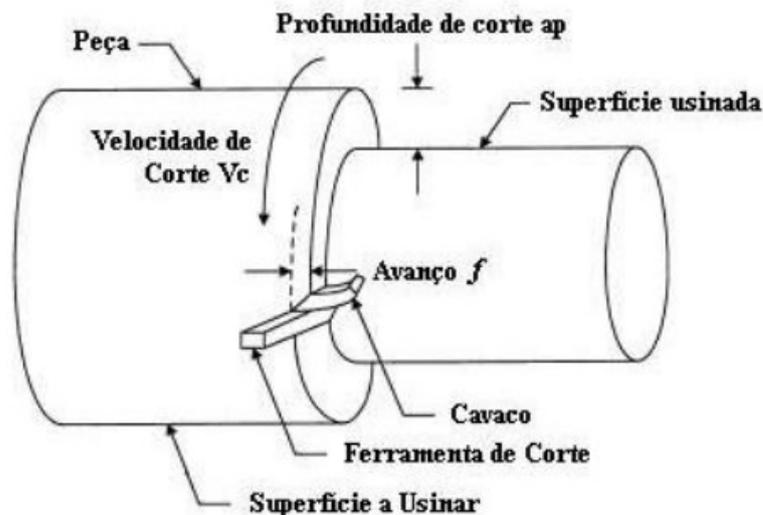
$$Q = Vc \cdot f \cdot ap \left[ \frac{cm^3}{min} \right] \quad \text{Equação 4}$$

As superfícies definidas sobre a peça são:

- 1) Superfície a usinar;

- 2) Superfície em usinagem, divide-se em superfície em usinagem principal e; secundária, de acordo com a aresta de corte com a qual está em contato;
- 3) Superfície usinada.

**Figura 4** - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo.



Fonte: AMORIM (2002)

#### 4.1.5 Ferramentas para operações de usinagem.

As ferramentas de corte utilizadas em usinagem possuem ângulos de corte que formam uma cunha, possibilitando a penetração no material e a retirada de sobremetal para deixar a peça conforme medidas especificadas em desenho. Pelos ângulos de corte adequados a usinagem pode ser melhorada e de acordo com a geometria da ferramenta de corte os cavacos resultantes do corte são retirados em pequenos fragmentos, o que gera melhores condições de segurança de trabalho e melhor conservação e operação da máquina ferramenta. Para a fabricação dos ângulos de corte das ferramentas de corte, deve-se tomar como referência os planos padronizados utilizados como referência geométrica e dimensional.

Tais ferramentas de corte são fabricadas com o formato do perfil ou operação de usinagem que será realizada. Sendo assim, uma ferramenta para facear no torno tem uma geometria que facilita a possibilidade do corte com a sua parte lateral, porém ela não será utilizada para torneamento interno ou externo.

Para a definição dos ângulos de corte das ferramentas de corte, deve-se tomar como referência os planos padronizados utilizados como referência geométrica e dimensional. A denominação das superfícies da ferramenta, dos ângulos e das arestas é normalizada pela norma NBR ISO 3685 (2017).

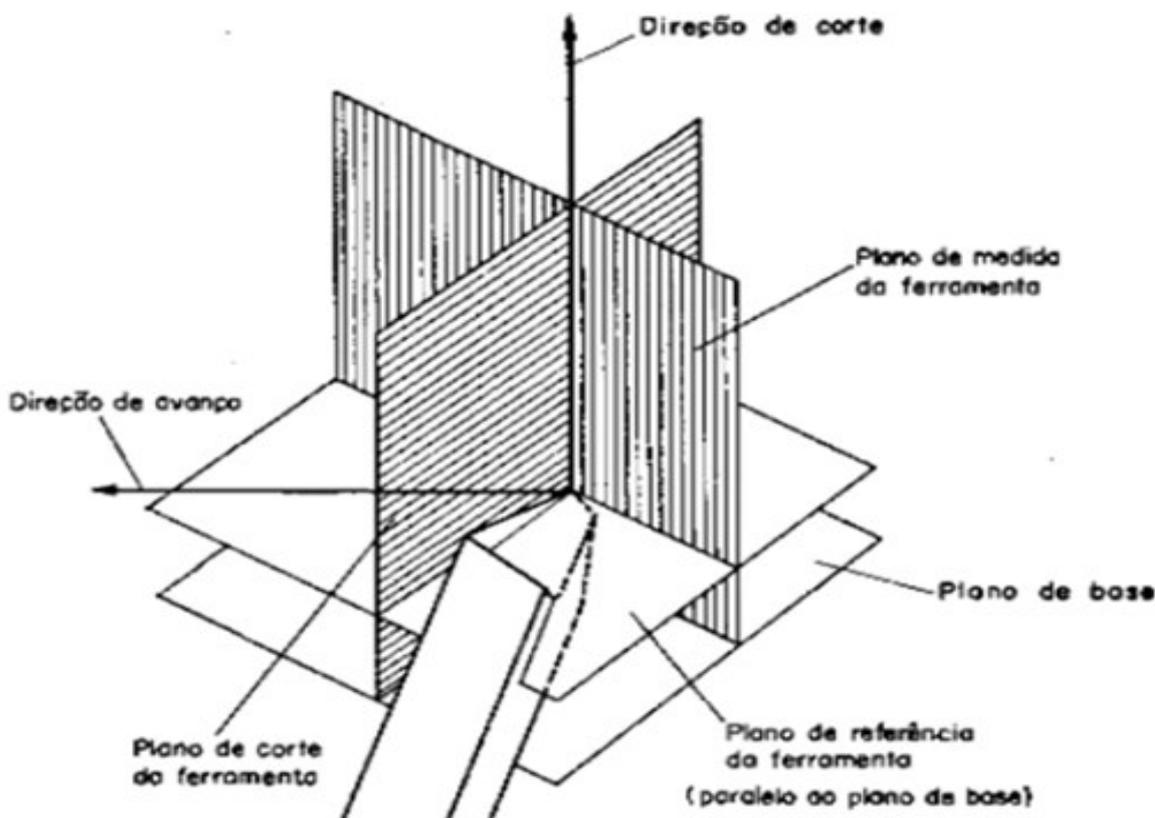
De acordo com Rocca (2015) os planos de referência utilizados para esta finalidade são descritos a seguir:

**Plano de referência (PR):** Fornece a referência de medida considerando o eixo de rotação da peça passando pelo ponto de referência na testa principal de corte perpendicular à direção efetiva de corte.

**Plano de corte (PC):** É perpendicular ao plano de referência passando pela aresta de corte da ferramenta.

**Plano de medida (PM):** É perpendicular ao plano de corte e ao plano de referência passando pelo ponto de referência dados sobre a aresta principal de corte da ferramenta.

Figura 5 - Sistema de referência da ferramenta de torno.



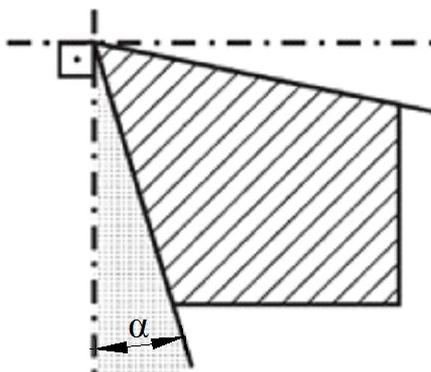
Fonte: (FERRARESI, 2018) Adaptado.

Para Rocca (2015), os ângulos da ferramenta de corte são classificados em: de folga  $\alpha$  (alfa), de cunha  $\beta$  (beta), de saída  $\gamma$  (gama), de ponta  $\epsilon$  (épsilon), de posição  $\chi$  (chi) e de inclinação de aresta cortante  $\lambda$  (lambda).

#### 4.1.6 Ângulo de folga $\alpha$

O ângulo de folga permite que a usinagem ocorra sem o atrito entre a peça e a lateral da ferramenta, sendo que seu tamanho influencia no desempenho da usinagem e varia de acordo com o material e o tipo de operação (faceamento, torneamento externo, etc.). Em ferramentas de metal duro o ângulo varia entre  $2^\circ$  e  $8^\circ$ .

Figura 6 - Representação do ângulo  $\alpha$  de folga

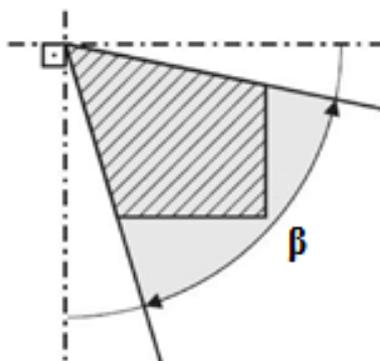


Fonte: (ROCCA, 2015)

#### 4.1.7 Ângulo de cunha $\beta$

O ângulo de cunha é responsável pelo corte do material usinado. É formado pela fabricação dos ângulos de folga e saída da ferramenta. O ângulo  $\beta$ , poderá variar de acordo com o material de  $40^\circ$  para materiais menos duros, até  $85^\circ$  para material de maior dureza e fragilidade.

Figura 7 - Representação do ângulo de cunha.



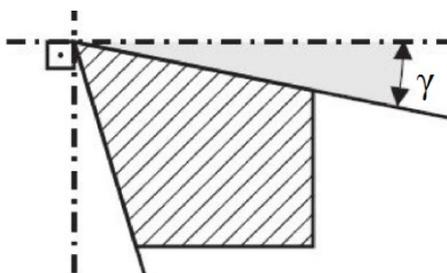
Fonte: (ROCCA, 2015)

#### 4.1.8 Ângulo de saída $\gamma$

Formado pela saída da ferramenta e pelo plano de referência medido no plano de medida; também determinado em função do material, tem influência sobre a formação do

cavaco e sobre a força de corte. Para usinar materiais moles  $\gamma = 15^\circ$  a  $40^\circ$ , materiais tenazes  $\gamma = 14^\circ$  e materiais duros  $\gamma = 0^\circ$  a  $8^\circ$ , geralmente as ferramentas de metal duro utilizam entre  $-2^\circ$  e  $8^\circ$ .

**Figura 8** - Representação do ângulo de saída



Fonte: (ROCCA, 2015)

#### 4.1.9 Ângulos em função do material

**Tabela 1** - Tabela com os ângulos recomendados em função do material.

MATERIAL	Ângulos		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Aço 1020 até 450 N/mm <sup>2</sup>	8	55	27
Aço 1045 de 420 a 700 N/mm <sup>2</sup>	8	62	20
Aço 1060 acima de 700 N/mm <sup>2</sup>	8	68	14
Aço ferramenta 0,9 %C	6 a 8	72 a 78	14 a 18
Aço inox	8 a 10	62 a 68	14 a 18
Fofo brinell até 250 HB	8	76 a 82	0 a 6
Fofo maleável ferrítico brinell até 150 HB	8	64 a 68	14 a 18
Fofo maleável perlítico brinell de 160 HB 240 HB	8	72	10
Cobre, latão, bronze (macio)	8	55	27
Latão e bronze (quebradiço)	8	79 a 82	0 a 3
Bronze para buchas	8	75	7
Alumínio	10 a 12	30 a 35	45 a 48
Duralumínio	8 a 10	35 a 45	37 a 45

Fonte: (ROCCA 2015) Adaptado.

#### 4.2 Metal duro/vídiã.

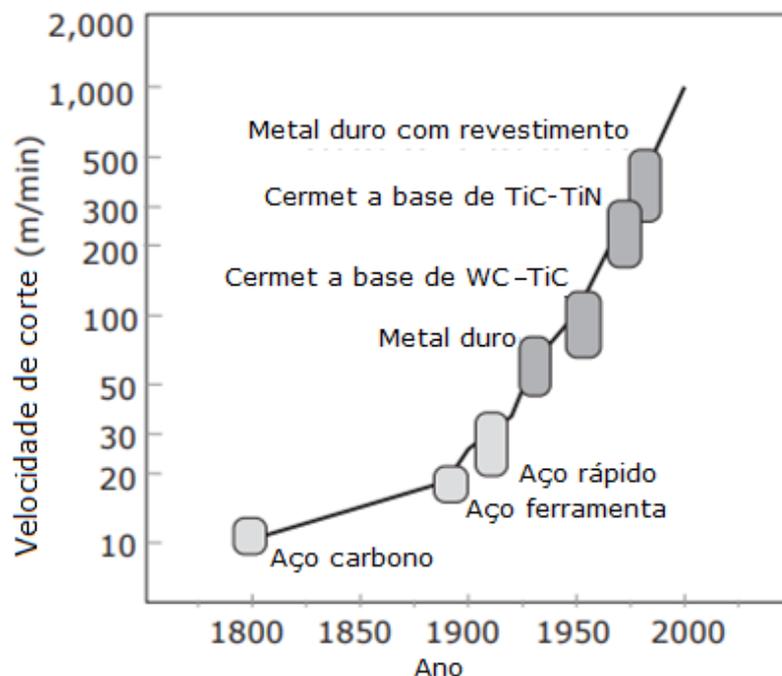
O Metal Duro é um dos materiais mais utilizados na fabricação de ferramentas de corte, se não o mais utilizado. Da língua inglesa Cemented Carbide, o Metal Duro é um material

compósito constituído por carboneto de tungstênio (WC) como fase dura e cobalto (Co) como fase aglutinante. O metal duro foi desenvolvido pela Osram Lamp Works em 1923 e colocado no mercado pela Krupp AG na Alemanha em 1927 como uma ferramenta de corte com o nome comercial de "WIDIA". O metal duro inovou no trabalho de corte ao atingir velocidades de corte de aço de 100 a 150 m/min, aproximadamente quatro vezes a velocidade de corte de aço de alta velocidade (20 a 40 m / min). Em 1928, a Sumitomo Electric Industries, Ltd. conseguiu a produção de uma matriz de trefilação, que foi o primeiro produto da Igetalloy. Em 1931, a empresa comercializou a ferramenta de corte de metal duro. Desde esse tempo, a empresa aprimorou continuamente o desempenho do metal duro para atender às necessidades de usinagem da época (STEMMER, 2005; KEIICHI, 2016).

O desempenho dos materiais das ferramentas de corte foi aprimorado em resposta às necessidades da indústria de obter maior velocidade de corte. O primeiro aço de alta velocidade apareceu no mercado no início dos anos 1900. Atualmente, o metal duro é responsável pela maioria dos materiais de ferramenta de corte, podendo cortar peças a uma velocidade mais alta que o aço ferramenta, como mostrado na Figura 9. Na segunda metade da década de 2018 foram desenvolvidas ferramentas de metal duro revestidas com composto de alumina ou titânio e permitiram uma velocidade de corte muito maior (KEIICHI, 2016).

O metal duro é o mais importante material para ferramentas de corte utilizado na indústria moderna, devido a sua combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, essa combinação é possível de obter-se pela variação da sua composição. É obtido pela metalurgia do pó, feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão (SANDVIK COROMANT, 2003).

**Figura 9** - Desenvolvimento de material de ferramenta de corte e velocidade de corte com o passar dos anos.



Fonte: (KEIICHI, 2016).

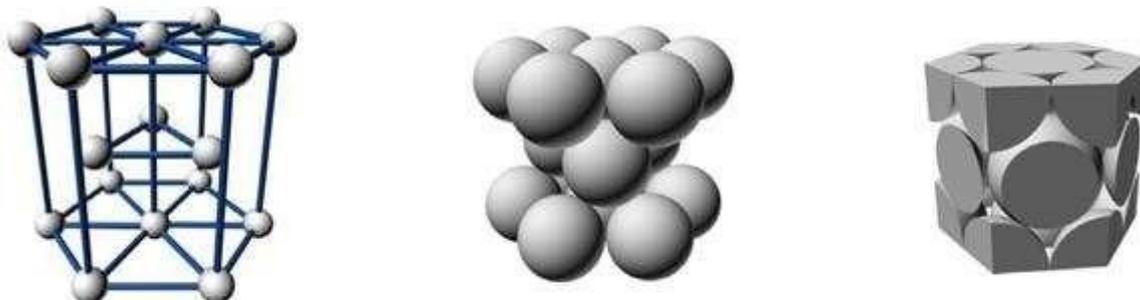
As pastilhas de carboneto metálico, conhecidas como metal duro, são fabricadas pelo processo de sinterização com a adição de carbonetos metálicos (ROCCA, 2015; STEMMER, 2005).

O metal duro apresenta uma altíssima resistência à compressão, dureza em torno de 1600 HV, mantendo essa elevada dureza até 1000 °C, dilatação térmica cerca de metade do aço, densidade na faixa de 14 kg/dm<sup>3</sup>, resistência a compressão de 3500 N/mm<sup>2</sup> a 6000 N/mm<sup>2</sup>, módulo de elasticidade  $E = 620000 \text{ N/mm}^2$ , elevada condutibilidade térmica (8 a 20 vezes a do aço) (STEMMER, 2005). As propriedades físicas e mecânicas variam de acordo com o tamanho das partículas de carbeto de tungstênio e com a porcentagem de cobalto (este último é responsável pela tenacidade), o valor da tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  é de 9 a 14 (MPa k-1) (MACHADO *et al.*, 2009).

O Carbeto de Tungstênio (WC), fase cerâmica do Metal Duro é um composto de estrutura cristalina hexagonal compacta Figura 10, formada pelos elementos carbono e tungstênio. Este material tem alta dureza e alta resistência ao desgaste, mesmo em condições de trabalho em alta temperatura, por isso suas principais aplicações atualmente são usadas em ferramentas de corte, brocas, perfuratrizes, matrizes, abrasivos, esferas para moagem de alta energia, entre outras (GONÇALVES, 2009).

A classe da pastilha é selecionada principalmente de acordo com: o material da peça (ISO P, M, K, N, S, H), tipo de método (acabamento, usinagem média, desbaste), condições de usinagem (boa, média, difícil), (Sandvik AB 2000-2018).

**Figura 10** - Estrutura Hexagonal Compacta para o Carbetto de tungstênio.



Fonte: (GONÇALVES, 2009).

**Tabela 2** - Aplicação e classificação dos materiais duros de corte

Grupo principal de aplicação			Grupo de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Materiais duros para corte		-	
P	azul	<b>Aço:</b> todos os tipos de aço e aço fundido, exceto aço inoxidável, com estrutura austenítica.	P 01 P 10 P 20 P 30 P 40 P 50	P 05 P 15 P 25 P 35 P 45	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
M	amarela	<b>Aço inoxidável:</b> aço inoxidável austenítico e aço austenítico/ferrítico e aço fundido.	M 01 M 10 M 20 M 30 M 40	M 05 M 15 M 25 M 35	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
K	vermelha	<b>Ferro fundido:</b> ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafite esferoidal e ferro fundido maleável.	K 01 K 10 K 20 K 30 K 40	K 05 K 15 K 25 K 35	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
N	verde	<b>Materiais não ferrosos:</b> alumínio e outros materiais não ferrosos, materiais não metálicos.	N 01 N 10 N 20 N 30	N 05 N 15 N 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
S	marrom	<b>Superligas e titânio:</b> ligas especiais, resistentes às altas temperaturas, baseadas em ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio.	S 01 S 10 S 20 S 30	S 05 S 15 S 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
H	cinza	<b>Materiais com alta dureza:</b> Aço temperado, materiais de aço fundido temperado, aço fundido com coquilha.	H 01 H 10 H 20 H 30	H 05 H 15 H 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>

<sup>a</sup> A diminuição do número associado à letra de identificação resulta no aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta (ver Tabela 6).

<sup>b</sup> O aumento do número associado à letra de identificação resulta no aumento da tenacidade (ver Tabela 6).

Fonte: NBR ISO 513 (2013)

O metal duro ainda hoje é de grande importância para a indústria de transformação, que há muito tempo os utilizam em processos de produção como corte, retificação e perfuração.

O metal duro representa uma classe de materiais compósitos, consistindo em um material duro, resistente ao desgaste, portanto, possui uma combinação única de dureza e resistência (LIJUN ZHANG, 2017).

**Tabela 3 - Composição das pastilhas comerciais de metal duro**

Designação	% WC	%TiC + TaC	%Co	Densd. (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (HV)	Tenacidade (Kg/mm <sup>2</sup> )
ISO						
P01	30	64	6	7,2	1800	75
P10	55	36	9	10,4	1600	140
P20	76	14	10	11,9	1500	150
P30	82	8	10	13	1450	170
P40	77	12	11	13,1	1400	180
P50	70	14	16	12,9	1300	200
K01	93	2	5	14,8	1750	120
K10	92	2	6	14,8	1650	150
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	170
K30	89	2	9	14,5	1450	190
K40	88		12	14,3	1300	210
M10	84	10	6	13,1	1650	140
M20	82	10	8	13,4	1550	160
M30	81	10	9	14,4	1450	180
M40	78	7	15	13,5	1300	200

Fonte: SANDVIK COROMANT, 2003

A Tabela 3 apresenta a composição química e algumas características correspondentes a diversas classes de metal duro. Pode-se ver nesta tabela que à medida que a quantidade de carbonetos sobe, a densidade cai e a dureza aumenta. Quando se introduz TaC (com ou sem nióbio), melhora-se tenacidade em relação às composições isentas deste carboneto. A substituição de TiC pelo TaC aparentemente não traz vantagens apreciáveis sob o ponto de vista de melhora da capacidade de corte. No entanto, é certo que o aumento simultâneo dos dois carbonetos produz melhores resultados na usinagem, possivelmente devido à dureza a quente dessas composições. Vê-se também na Tabela 3 que à medida que o volume de cobalto cresce (e, com isso, diminui o volume de carbonetos) a tenacidade (medida pela resistência à ruptura transversal) aumenta (GABALDO; PRADO, 2010).

#### 4.2.1 Cobalto: um elemento tóxico que compõe o metal duro

O cobalto é um elemento químico que tem sua utilização principal na indústria metalúrgica para produção de materiais com características especiais de dureza e resistência

como o metal duro. De acordo com a atividade desenvolvida pelo trabalhador, a exposição ocupacional pode ser ao pó do metal puro e/ou a poeiras contendo óxidos ou sais de Co. A exposição ocupacional envolve principalmente o trato respiratório e a pele, sendo o órgão alvo dependente da via de exposição. Considerando as principais vias de exposição ocupacional, há efeito tóxico no trato respiratório, pele, sistema cardíaco e glândula tireoide, assim como há o potencial carcinogênico (ALVES e DELLA ROSA, 2002).

Quanto ao fornecimento, as perspectivas para o cobalto é que os principais produtores podem não ter capacidade de cumprir as metas de produção e os planos de expansão, em virtude de obstáculos técnicos e financeiros envolvidos na extração. Pesquisadores da Universidade da Califórnia afirmam que a oferta pode não ser suficiente para atender ao desenvolvimento tecnológico dos próximos anos, pois sua produção ocorre como um subproduto da extração de metais, como o níquel e o cobre, o que, além de dificultar, torna sua extração dependente de outros minérios. Outro ponto negativo é que a concentração das reservas de cobalto estão em poucos países, como na China e no Congo, principal produtor no mercado atualmente, o que pode implicar em dificuldades de suprimento devido a fatores geopolíticos (GUERRA; MOSCON, 2020).

### **4.3 Avarias, desgastes e mecanismos de desgaste das ferramentas**

Da Silva *et al.*, (2004), afirma que das muitas variáveis que afetam o bom desempenho das operações de usinagem, a ferramenta de corte, embora pequena e de relativo baixo custo, é a mais crítica.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. Estudar e entender o processo pelo qual as ferramentas se desgastam é muito importante, pois pode permitir ações coerentes e efetivas para reduzir a taxa desse processo, prolongando a vida da aresta de corte. Embora os custos com ferramentas de corte representem apenas uma pequena fração do custo de fabricação, desgastes acelerados e/ou avarias frequentes levam a paradas da máquina para troca, e isso significa custos adicionais e perda de produtividade. Além disso, o conhecimento do processo de desgaste da aresta fornecerá subsídios para que haja evolução dos materiais das ferramentas, tornando-as mais resistentes aos fenômenos negativos que ocorrem durante o processo de usinagem, (MACHADO *et al.*, 2009, p. 231).

Ferraresi (2018) afirma que o desgaste de uma ferramenta de metal duro é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados componentes do desgaste que dependendo do tipo de material usinado e das condições de usinagem, predominará uma ou outra componente do desgaste sobre as demais.

O percurso de avanço é muito usado na furação com broca helicoidal. Deve-se distinguir os procedimentos de desgastes das ferramentas de acordo com o material de que a ferramenta foi construída. A pastilha de metal duro tem desgaste progressivo chegando a valores que causará quebra do gume. Nas pastilhas cerâmicas, geralmente há quebras de pequenos fragmentos da aresta cortante e a vida da ferramenta nesse caso pode ser definida não pelos desgastes, mas pelo grau de destruição da aresta cortante do qual o emprego da ferramenta não é mais conveniente, FERRARESI (2018).

Usinabilidade dos materiais é a propriedade de trabalhar o material com ferramentas de corte. Na usinagem com remoção de cavaco percebe-se que os materiais se comportam de maneira distinta, sendo que alguns podem ser trabalhados com maior facilidade e outros não. Entre os problemas que frequentemente ocorrem, pode-se citar: desgaste rápido da ferramenta, lascamento do gume de corte, mau acabamento superficial da peça usinada entre outros (STEMMER, 2005).

De acordo com Machado (2009), existem três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem devido a mudança na geometria da aresta de corte: **Avaria, Desgaste e Deformação Plástica**. Para ilustrar esses problemas que conduzem à perda e à consequente substituição das arestas, suas definições são apresentadas a seguir:

**Avaria:** Ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela **quebra, lascamento ou trinca** da aresta de corte. A quebra e o lascamento levam à destruição total ou à perda de uma quantidade considerável de material da aresta de forma repentina e imprevisível. A quebra é mais comum em ferramentas com baixa tenacidade, como as cerâmicas e os ultraduros, enquanto que o lascamento depende também da tenacidade da ferramenta, que poderá ocorrer até mesmo em ferramentas de aço rápido (MACHADO *et al.*, 2009).

**Trinca:** Causa a abertura de uma fenda no corpo da ferramenta de corte. No caso da trinca não existe a perda imediata de material da aresta de corte, mas essa trinca pode comprometer a continuidade do processo de corte pela sua transformação em sulco (no caso de trincas de origem térmica (MACHADO *et al.*, 2009).

**Lascamento:** Pode ocorrer quando a trinca é mais superficial, e a quebra ocorrerá se a trinca for mais profunda. As trincas são comumente observadas em ferramentas de metal duro e cermets, podendo aparecer também em ultraduros e aço rápido, enquanto as cerâmicas, na maioria das vezes, são frágeis demais, e a propagação da trinca é imediata, praticamente sem deformação. Sendo assim, uma trinca na ferramenta cerâmica promove instantaneamente seu lascamento ou quebra (MACHADO *et al.*, 2009).

**Desgaste:** De acordo com a Norma NBR ISO 3685 (2017), desgaste em ferramentas é definido como a "alteração na forma da ferramenta a partir de sua forma original, durante o corte, o que resulta na perda progressiva de material da ferramenta ou deformação".

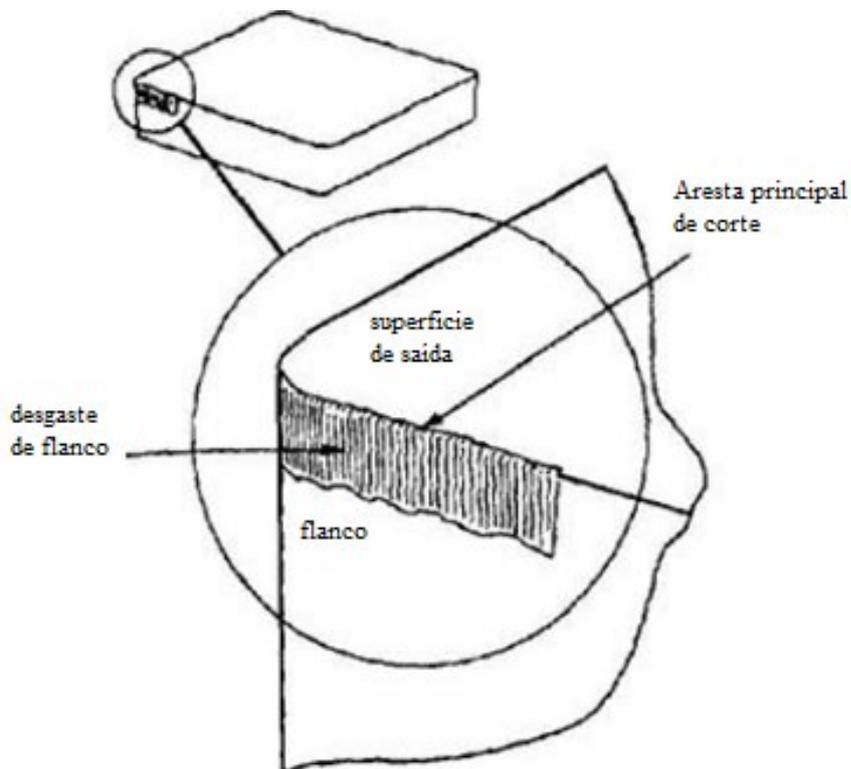
No desgaste, ao contrário da avaria, essa perda acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes no nível atômico, às vezes no nível dos grãos do material. O desgaste pode ocorrer por meio de vários mecanismos e a deformação plástica pode fazer parte desses mecanismos. Nesse processo, a temperatura durante o corte tem um papel decisivo e atinge ferramentas de corte de qualquer material havendo alterações geométricas, e ao desgaste em usinagem, a mudança da geometria da ferramenta de corte por perda de massa (MACHADO *et al.*, 2009).

Conforme Diniz *et al* (2006), existem três tipos principais de avarias e desgastes de ferramenta: desgaste de flanco, desgaste de cratera e deformação plástica da aresta de corte.

**Desgaste de flanco:** De acordo com Amorim (2002 p. 17), o desgaste de flanco,

“[...] ocorre nas superfícies de folga, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas. Quando atinge a aresta principal de corte, resulta num aumento das temperaturas e forças envolvidas no corte, podendo causar vibrações tanto na ferramenta como na peça. Já na aresta secundária de corte, da qual dependem o controle dimensional e a qualidade do acabamento superficial da peça, um desgaste excessivo resulta numa superfície mal acabada e peças fora da especificação. Em condições normais de usinagem, o desgaste de flanco é o tipo de falha que apresenta o maior risco de danos à peça e que exige mais potência de corte, motivo pelo qual costuma ser o mais usado na determinação de critérios de fim de vida de ferramenta.”

**Figura 11** - Representação esquemática do desgaste de flanco

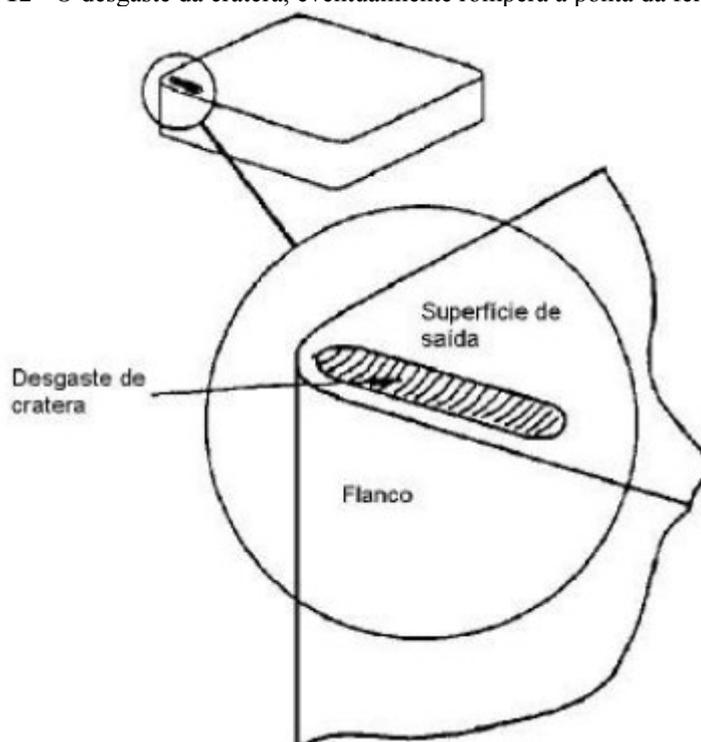


Fonte: AMORIM (2002)

**Desgaste de cratera:** Para Amorim (2002 p. 17), o desgaste de cratera,

“[...] ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza, durante o corte, a zona de deslizamento do cavaco. Este tipo de desgaste resulta de uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão, e ocorre principalmente a altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Devido à redução da resistência a abrasão causada pela difusão, é favorecido o desgaste abrasivo, sendo então a forma da cratera resultante da distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. O desgaste assume então a forma de uma cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte”.

**Figura 12** - O desgaste da cratera, eventualmente romperá a ponta da ferramenta.



Fonte: (AMORIM, 2002)

**Figura 13** - Crateras são vistas na ponta da ferramenta de carboneto depois de cortar metal por algum tempo



Fonte: (REBEYKA, 2016)

**Deformação plástica:** Diferente do desgaste onde ocorre a perda de material, deformação plástica é a mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material. Ela ocorre devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte devido à força de cisalhamento. Em determinados casos, vai levar à total destruição da cunha cortante. É mais comum acontecer em ferramentas com resistência relativamente baixa ao cisalhamento

e com maior tenacidade, como o aço rápido, as ligas fundidas e o metal duro. Nas cerâmicas é difícil de ocorrer deformação plástica, porque a grande fragilidade desse grupo de materiais não apresenta campo plástico suficiente para permitir o deslocamento de material, promovendo, antes, a quebra ou fratura (MACHADO *et al.*, 2009).

É comum encontrar na literatura (MACHADO *et al.*, 2009) *apud* (TRENT & WRIGHT, 2000) o tratamento da deformação plástica como desgaste, o que é perfeitamente aceitável, uma vez que ambos promovem a mudança da geometria da ferramenta. o que pode culminar na destruição total da aresta de corte.

Para Machado (2009), **as duas causas principais** em um processo de usinagem que se dá em **troca da ferramenta de corte** por motivo do fim de vida da ferramenta de corte são:

**1ª.** Ocorrência de uma avaria (trinca, lascamento ou quebra):

Ocorre mais frequentemente no corte interrompido (fresamento) ocasionado pelos choques térmicos e mecânicos que ocorrem nesse processo. No corte contínuo (torneamento), isso dificilmente vai ocorrer se a ferramenta e os parâmetros estiverem adequados, pode acontecer mais frequentemente a avaria se as condições de corte e a ferramenta do torno estiverem fora da especificação para o processo ou quando a ferramenta de corte já possuir algum defeito de fabricação, coisa que raramente acontece (MACHADO *et al.*, 2009).

**2ª.** O desgaste e a deformação ocorrem tanto em cortes interrompidos (fresamento) ou em cortes contínuos (torneamento) **tanto nas superfícies de folga como na superfície de saída** das ferramentas e podem atingir proporções elevadas que podem deixar a usinagem final fora das especificações (MACHADO *et al.*, 2009).

#### 4.3.1 Vida da ferramenta

De acordo com Ferraresi (2018) e Stemmer (2005), a vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder a capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido e que após esse tempo a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída. Geralmente esse tempo de vida é expresso em minutos, e em certos casos é definida pelo percurso de corte ou pelo percurso de avanço, sendo que o **percurso de corte L** é dado em quilômetros:

$$L = v.T \frac{1}{1000} \quad \text{Equação 5}$$

e o **percurso de avanço La** é dado em milímetros:

Onde:

$$La = a \cdot n \cdot T$$

Equação 6

T = vida da ferramenta em minutos.

v = Velocidade de corte em m/min.

a = Avanço em mm por volta

n = Rotação em r. p. m.

É fundamental que a ferramenta de corte não ultrapasse o seu fim de vida, sendo que após seu fim de vida, as condições de corte recomendadas pelo fabricante no processo de usinagem podem não ser adequadas, aumentando significativamente a chance de se produzir peças fora do especificado em desenho. Para que a ferramenta de corte não ultrapasse seu fim de vida, diversos critérios são utilizados para determinar quando uma ferramenta deve ser substituída. Esses critérios são relacionados ao nível de desgaste na ferramenta, e suas consequências diretas, tais como nos diz FERRARESI (2018) e STEMMER (2005):

- Desvios nas tolerâncias dimensionais;
- Desvios nas tolerâncias geométricas;
- Perda de qualidade superficial da peça;
- Aumento no nível de vibrações no processo;
- Aumento no nível de esforços no processo;
- Aumento do custo de reafiação da ferramenta.

#### 4.3.2 Ensaio de usinabilidade baseado na vida da ferramenta

Os métodos de ensaio de usinagem podem ser de **longa** ou **curta duração**. O ensaio de curta duração tem a vantagem de utilizar um consumo mínimo de material e de ser realizado em um tempo relativamente pequeno. Mas quando se necessita traçar as curvas de vida de uma ferramenta para um determinado material com uma precisão razoável, deve-se recorrer a ensaios de longa duração. No ensaio de longa duração, a aresta cortante da ferramenta trabalhando em **condições normais de usinagem**, deve ser destruída ou gasta durante o ensaio e, portanto, necessitam de um tempo longo e elevado gasto de material FERRARESI (2018).

A precisão de um ensaio de longa duração tem sentido para um determinado material, quando esse material pertence a um lote da mesma corrida e mesmo tratamento térmico, no qual foi realizado o ensaio FERRARESI (2018).

#### 4.4 Critérios empregados no ensaio de durabilidade de ferramentas

Variados ensaios de usinagem têm sido propostos por pesquisadores para julgar o comportamento do material, numa combinação peça ferramenta em relação das grandezas características da usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial, temperatura de corte etc. Os ensaios mais comuns ou de maior interesse na usinabilidade podem-se agrupar nos critérios básicos e específicos FERRARESI (2018).

No que se refere aos critérios usados para a avaliação do comportamento em usinagem do material, (combinação peça-ferramenta) nos ensaios descritos a seguir, Ferraresi (2018) classificou-os como critérios básicos ou específicos, da seguinte forma:

##### 4.4.1 Critérios básicos de ensaio de durabilidade:

###### *a) Critérios baseados na vida da ferramenta:*

- Curvas de vida da ferramenta. Velocidade  $v_{60}$  ;
- Método do comprimento usinado;
- Método do faceamento de BRANDSMA;
- Método do aumento progressivo da velocidade de corte;
- Ensaio de sangramento com ferramenta bedame;
- Método radioativo;

###### *b) Critérios baseados na força de usinagem:*

- Método da pressão específica de corte;
- Método da tensão de cisalhamento;
- Método da força de avanço constante;

###### *c) Critérios baseados no acabamento superficial*

###### *d) Critérios baseados na produtividade*

##### 4.4.2 Critérios específicos de ensaio de durabilidade:

###### *e) Critério baseado na análise dimensional*

###### *f) Critério baseado na temperatura de corte.*

###### *g) Critério baseado nas características do cavaco.*

- Grau de recalque;
- Coefficiente volumétrico e forma do cavaco;
- Frequência e amplitude de variação da força de usinagem.

#### ***h) Critério baseado na energia fornecida pelo pêndulo***

Pêndulo de LEYENSETTER;

Pêndulo de EHRENREICH.

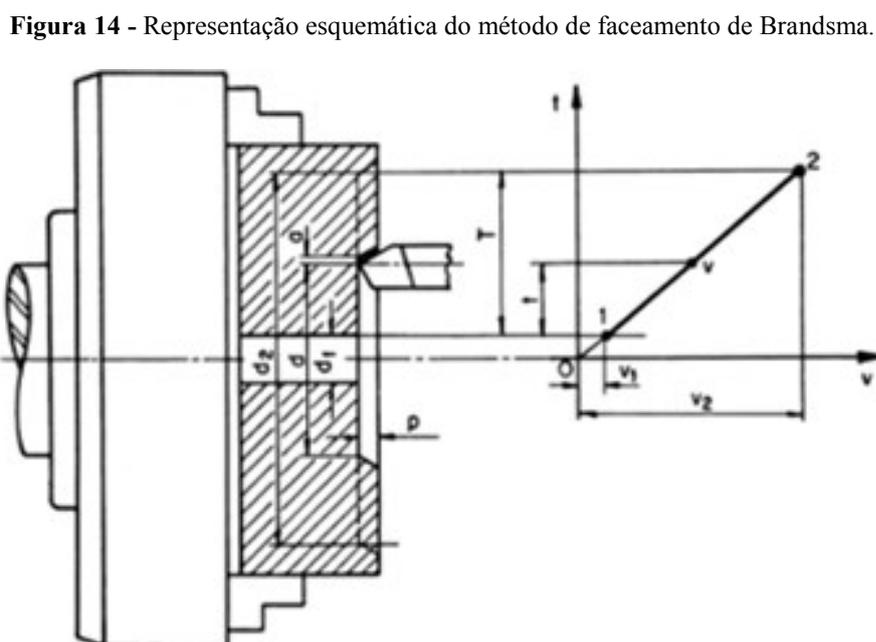
Pela grande quantidade de critérios de usinabilidade, não serão inclusos todos estes, apenas os mais utilizados, ou mais relacionados ao escopo deste trabalho. De acordo com Ferraresi, 2018, os mais usados são aqueles relacionados à vida da ferramenta, às forças de usinagem e ao acabamento superficial.

O critério de usinabilidade utilizado deve ser escolhido da maneira mais adequada para avaliar o impacto da usinagem na ferramenta.

#### **4.4.3 Método do faceamento de BRANDSMA (1936)**

É um ensaio de curta duração que permite avaliar o comportamento de uma ferramenta até atingir o colapso. Este método consiste em usinar na operação facear um disco com rotação e avanços constantes, do centro para a periferia. Inicia-se com uma velocidade pequena, correspondente ao diâmetro do furo do disco na Figura 14, e chega-se a uma velocidade bem maior, definida pelo aparecimento da queima da aresta cortante. Para esse teste o tarugo de metal deve ter um diâmetro relativamente grande, para permitir a destruição da ferramenta em uma única operação de faceamento FERRARESI (2018).

De acordo com a Figura 14 tem-se as seguintes relações:



Fonte: FERRARESI (2018).

$$V = \frac{\pi \cdot n}{1000} (d1 + 2 \cdot a \cdot n \cdot t) \quad \text{Equação 7}$$

$$V1 = \frac{\pi \cdot d1 \cdot n}{1000} \quad \text{Equação 8}$$

$$V2 = \frac{\pi \cdot d2 \cdot n}{1000} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

V1 = Velocidade 1 (Velocidade inicial em m/min.)

V2 = Velocidade 2 em m/min.

$\pi$  = pi radiano

d1 = diâmetro 1 em mm

d2 = diâmetro 2 em mm

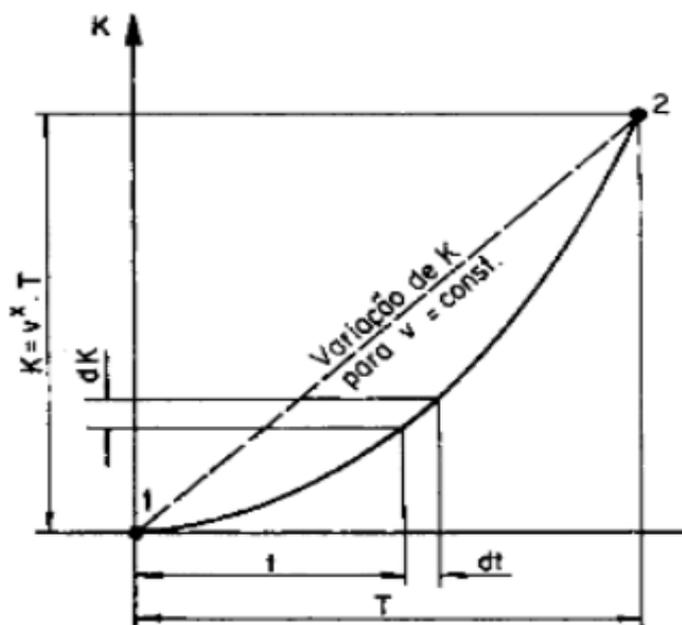
n = rpm

Como grandeza comparativa desse método utiliza-se a velocidade de corte equivalente  $V_r$ , isto é, a velocidade de corte constante que produz, no mesmo tempo de ensaio T, o mesmo desgaste da ferramenta, desgaste esse obtido em ensaio anterior com  $v_c$  Equação 10 a as mesmas condições de usinagem. Podemos calcular o seu valor de uma forma muito simples utilizando a fórmula de Taylor:

$$T \cdot V^x = K$$

Válida no intervalo de tempo correspondente entre o início e o fim da operação e que exista uma correspondência biunívoca entre o desgaste convencional e o valor de K, Figura 15.

**Figura 15** - Variação da constante K da fórmula de Taylor em função do tempo de usinagem.

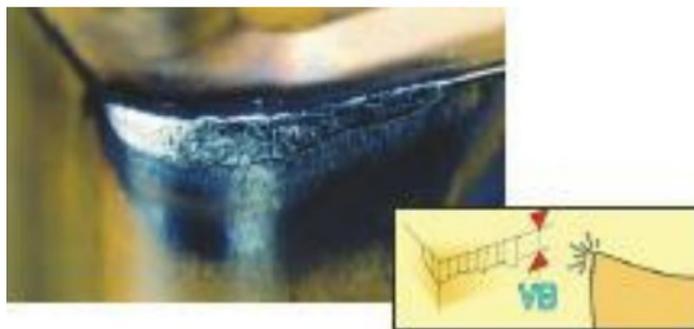


Fonte: FERRARESI (2018)

#### 4.4.4 Critério da largura da marca de desgaste do flanco:

De acordo com STEMMER (2005), o critério da largura da marca de desgaste do flanco é o método de emprego mais frequente na indústria para a determinação do fim da vida da ferramenta de metal duro e cerâmica. Uma vez alcançada a largura da marca de desgaste da ordem de 0,8mm a 2mm, as ferramentas de metal duro perdem a eficiência de corte. Pastilhas mais duras e frágeis como as de cerâmica não admitem desgastes maiores do que 0,5 mm, sob pena de ocorrer severo lascamento da ferramenta.

Já para Diniz *et al.* (2006), quando as ferramentas de metal duro utilizam cobertura, o desgaste de flanco (VB) em geral é muito pequeno ou inexistente, com crescimento lento devido à resistência da camada de cobertura da pastilha, até atingir valores **VB** da ordem de 0,3 mm a 0,4 mm. Nessa faixa, a cobertura já está quase que totalmente consumida pelo desgaste, então o corte passa a ser realizado pelo substrato e cresce rapidamente, chegando a valores de 0,8 a 1,0 mm, em um tempo muito curto, devendo ser substituída a ferramenta.

**Figura 16 - Desgaste de flanco VB**

Fonte: (GRIMA, 2015)

#### 4.5 Ferramentas de diamante

O torneamento de materiais com ferramentas de diamante natural e artificial, estimulou a realização de diversos trabalhos que buscaram entender o processo de usinagem em termos do mecanismo de remoção de material. Esses materiais apresentam excelentes resultados, em que tolerâncias de forma de alguns centésimos de micrômetros e rugosidades Ra menores que 10 nm eram normalmente alcançadas. O torneamento de ultra precisão é realizado com ferramentas monocortantes de diamante, que tem como principal característica elevada dureza e resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e alta condutividade térmica (GONÇALVES, 2009).

**Figura 17 - Ferramenta com ponta de diamante soldada utilizada em vários processo de usinagem.**

Fonte: (Gonçalves, 2009).

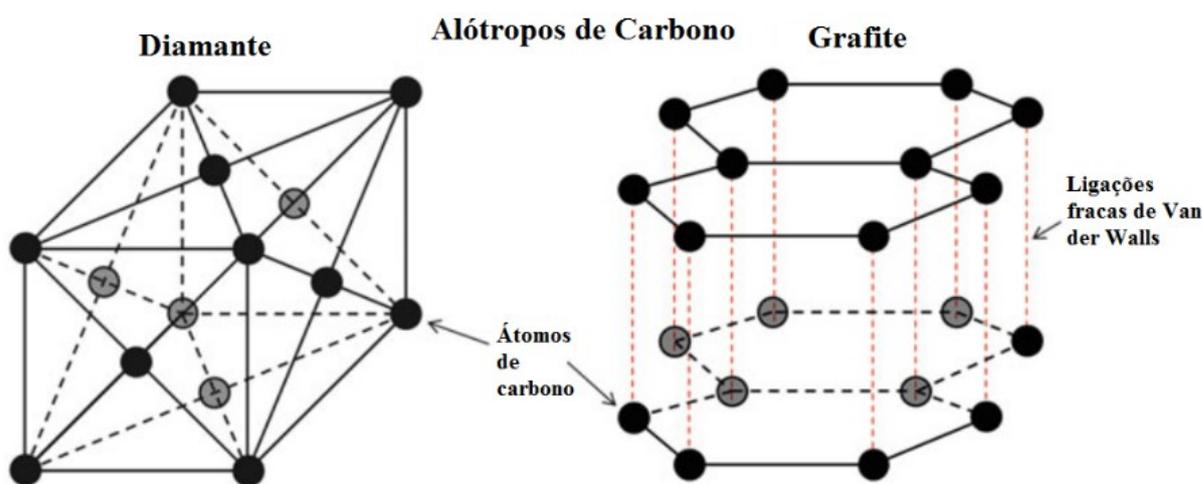
Como bem nos assegura Gonçalves (2009), as ferramentas de diamante podem ser encontradas em diferentes formas: Ferramentas com superfície de corte com forma circular; Ferramentas com superfície de corte com forma truncada; Ferramentas com superfície de corte afiada. As ferramentas de diamante circulares são as mais empregadas e usadas na fabricação de superfícies anesféricas. Os raios de ponta para ferramentas circulares geralmente variam de 0,1 mm a 100 mm dependendo do tipo de aplicação.

Raios grandes, segundo Blackekey e Scattergood (1991) apud Gonçalves 2009, implicam nas possibilidades de avanços maiores e a espessura crítica de usinagem se desloca em direção à espessura máxima de usinagem, tendo como consequência a melhora na qualidade superficial.

Para este trabalho, foi construída uma ferramenta de usinagem em que o elemento principal é a liga denominada de “Diamante Metálico 4C”. Desenvolvida por Beccari (2019) e aprimorada por Guisard Restivo (2020), as ligas Diamante Metálico são uma gama de ligas multicomponentes que vão de Diamante Metálico 1 a Diamante Metálico 8, as quais tiveram suas propriedades físico-químicas e mecânicas muito bem avaliadas, alcançando durezas elevadas, sendo a maior delas a liga 4. Neste trabalho foi feita a pesquisa aplicada com esse material.

Por centenas de anos o diamante natural foi usado como ferramenta de corte e trata-se do material de maior dureza e resistência ao desgaste da natureza, com excelente condutividade térmica, possui dureza Vickers  $> 80$  GPa devido à suas ligações covalentes curtas ( $1,54 \text{ \AA}$ ) entre seus átomos de carbono e a estrutura cristalina cúbica. As ferramentas de diamante natural são usadas principalmente quando é necessário super acabamentos nos componentes usinados (MACHADO *et al.*, 2009; KANYANTA, 2016).

**Figura 18** - Visão geral sobre a dureza do diamante



Fonte: (KANYANTA, 2016)

Observe na Figura 18 exemplos de alótropos de carbono, isto é, diamante à (esquerda) e grafite à (direita). Grafite tem uma dureza muito menor em comparação ao diamante por causa de sua estrutura de cristal em camadas com Van der Waals unindo as camadas. Existem vários outros alótropos de carbono (LOOS, 2015 apud KANYANTA, 2016, p. 15).

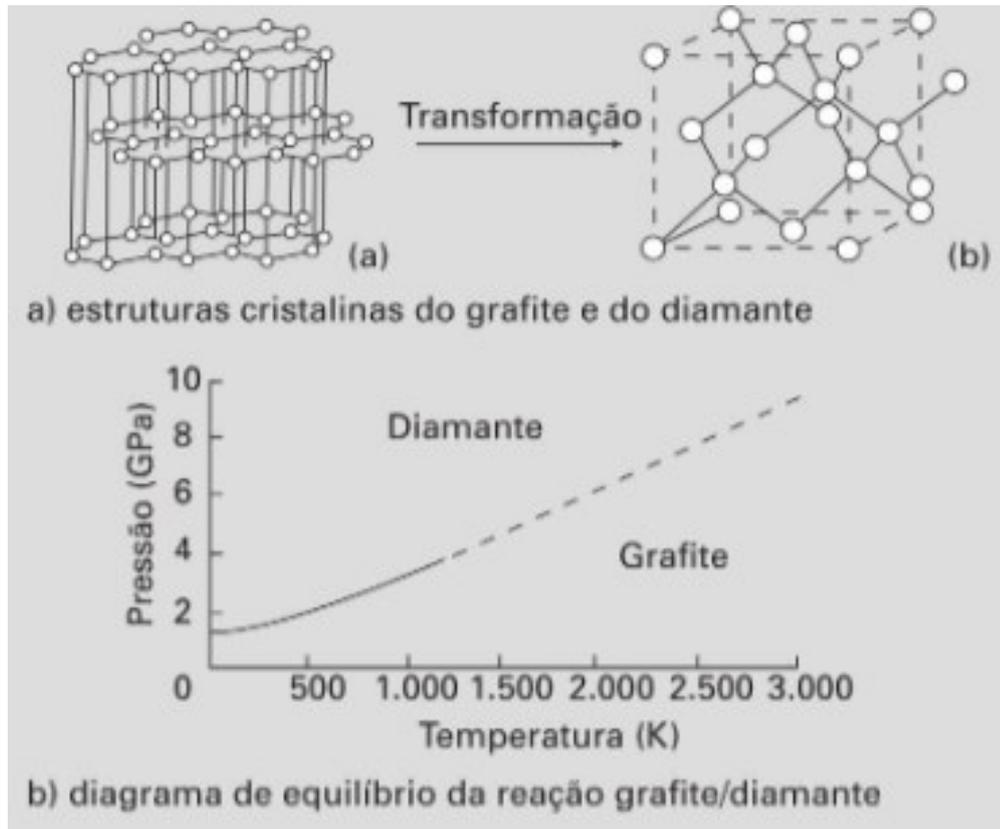
Entretanto, por causa da sua fragilidade e risco de falha sob impacto, e também por conta do seu alto custo, o diamante natural tem sua aplicação limitada como ferramentas de corte, principalmente após o surgimento dos diamantes e dos cBNs (Nitreto Cúbico de Boro) sintéticos, que podem substituí-lo com bastante eficiência (MACHADO *et al.*, 2009).

Nos anos 1950 pela primeira vez os diamantes sintéticos foram produzidos, mas como ferramenta de corte entraram no mercado no final da década de 1970. O PCD (Diamante Policristalino) e o PcBN (nitreto cúbico de boro policristalino) podem ser encontrados como uma camada de 0,5 mm a 1,0 mm, de espessura sinterizada, em uma placa de metal duro, que são cortadas e brasadas geralmente em insertos de metal duro, ou então, mais raramente, usadas como insertos inteiriços (MACHADO *et al.*, 2009).

O diamante sintético é obtido sujeitando o carbono, na forma de grafite, a temperaturas e pressões extremamente altas (da ordem de 2.000 °C e 7 GPa). Os átomos de carbono e grafite estão arranjados na forma hexagonal, mas após a sinterização, ele se transforma em diamante, com uma estrutura cúbica de face centrada (CFC). A Figura 18 ilustra a estrutura cristalina do grafite e do diamante, apresenta o diagrama de equilíbrio de ambos. Para ser menos dispendioso, o processo é realizado na presença de um catalizador da reação de transformação, habitualmente o cobalto (MACHADO *et al.*, 2009).

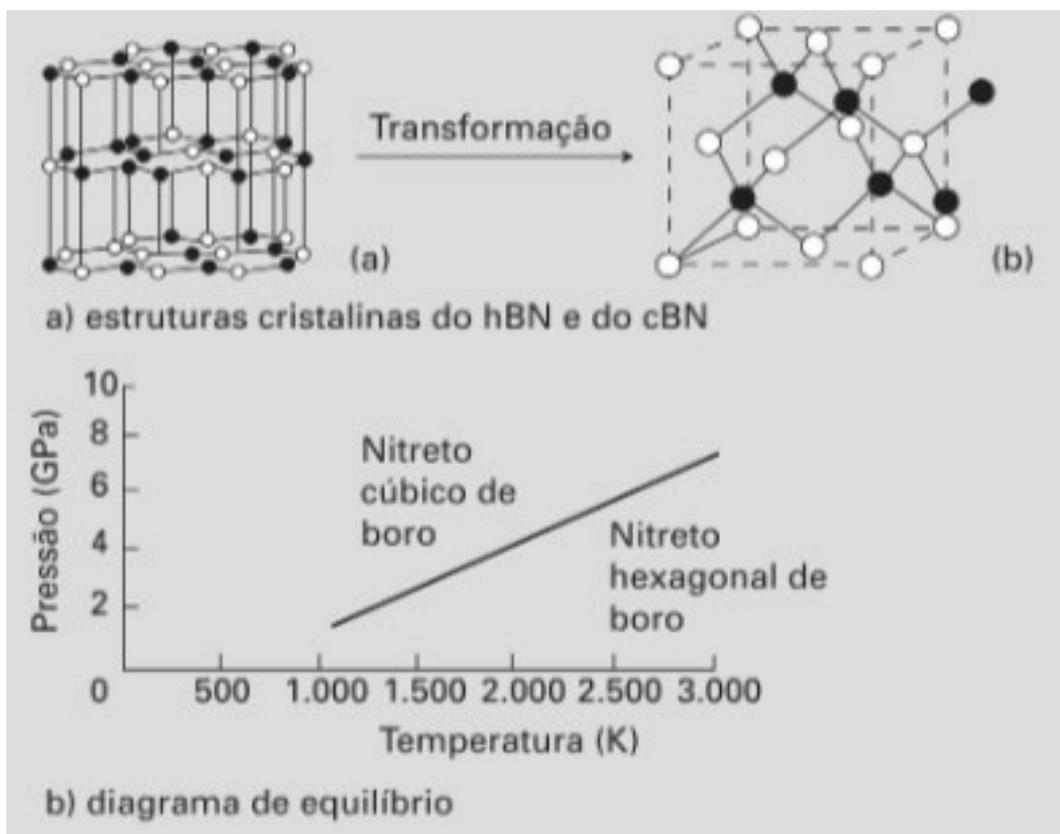
De maneira parecida e pouco tempo depois de o diamante sintético ser obtido, o hBN (nitreto hexagonal de boro) também foi transformado em cBN (nitreto cúbico de boro). O grafite, o hBN é frágil e escorregadio, enquanto o cBN é duro e resistente ao desgaste em menor escala que o diamante, mas superior às cerâmicas. A figura 19 apresenta a estrutura cristalina do hBN e do cBN, bem como o diagrama de equilíbrio entre ambos, muito parecido com o da figura 18. Para acelerar as reações, o solvente nesse caso é um nitreto metálico, que reduz a temperatura e a pressão de síntese para aproximadamente 1.500 °C e 6 GPa, respectivamente (MACHADO *et al.*, 2009, *apud* HEATH, 1986). Com o andamento da transformação, os cristais, sejam de diamante ou de cBN, crescem:

**Figura 19** - Estrutura do grafite, do diamante e diagrama do equilíbrio grafite/diamante:



Fonte: (MACHADO *et al.*, 2009 *apud* HEATH, 1986)

**Figura 20** - Estrutura do hBN, do cBN e diagrama do equilíbrio grafite/diamante

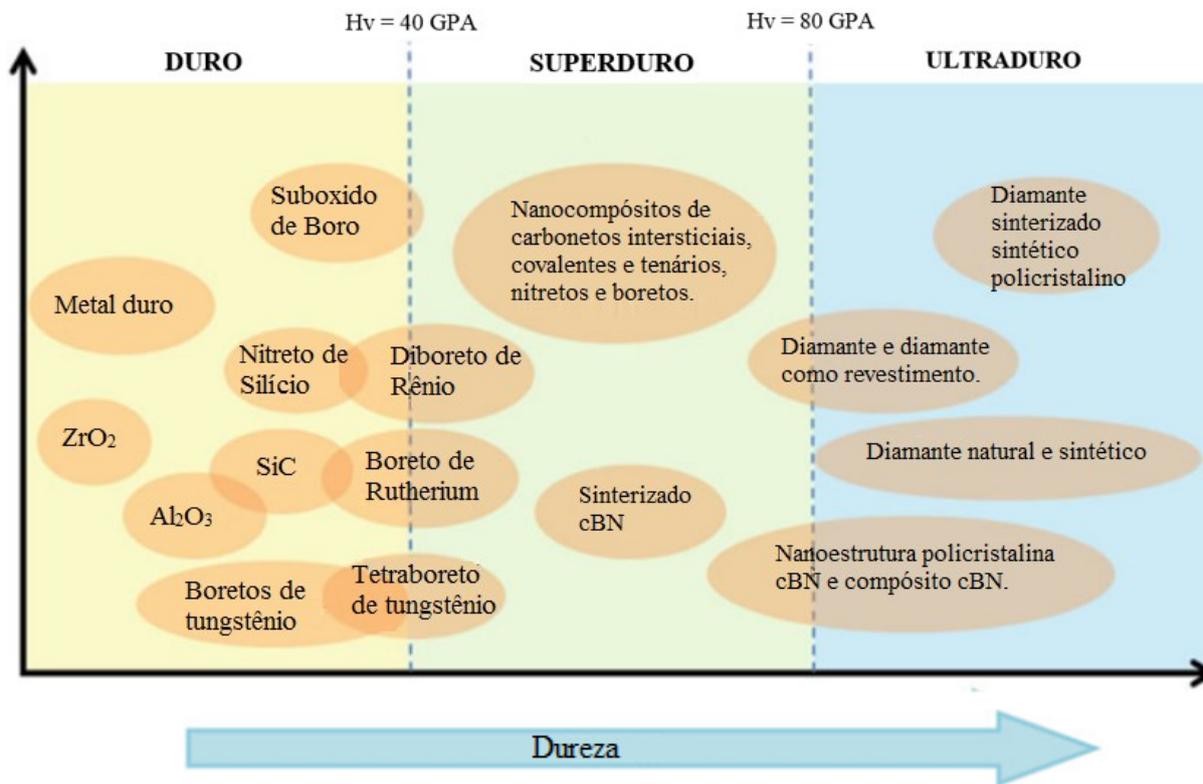


Fonte: (MACHADO *et al.*, 2009 *apud* HEATH, 1986).

Materiais duros, super-duros e ultra-duros, como óxidos, boretos, nitretos e carbonetos de metais, cermetos, nitretos de carbono, nitreto de boro cúbico (c-BN) e diamante são amplamente utilizados em muitas aplicações em que alta dureza, alta incompressibilidade e inércia química são um requisito primário. Estes incluem a utilização como abrasivos para polimento, retificação, materiais para ferramentas de corte e revestimentos resistentes ao desgaste e implantes médicos como as peças de desgaste da prótese da articulação do quadril.

Os materiais duros, super-duros e ultra-duros mais utilizados na lapidação ou operações de polimento são alumina, carboneto de silício e diamante (KANYANTA, 2016).

**Figura 21** - Classificação da dureza dos materiais nas três categorias.



Fonte: (KANYANTA, 2016).

Para o uso de materiais duros, super duros e ultra duros como ferramentas de corte em operações de usinagem e corte, a ferramenta pode ser monocristalina ou em uma forma policristalina onde, por exemplo, partículas de diamante ou c-BN são sinterizadas juntas (geralmente em temperaturas e pressões mais altas) para formar uma ligação total e, em alguns casos, um crescimento (isto é, partículas um crescimento) para formar um material policristalino (KANYANTA, 2016).

#### 4.5.1 Nova liga “Diamante Metálico”

De acordo com Guisard Restivo (2020), essas novas ligas metálicas denominadas “Diamante Metálico” foram desenvolvidas pelo próprio com base em projeto de ocupação de reticulado empregando 9 elementos distintos. A equação de cromo equivalente é o parâmetro chave na seleção dos elementos de liga, no sentido de que o coeficiente mais alto do elemento escolhido irá expandir e estabilizar o campo da fase cúbica de corpo centrado. Outro conceito assumido no projeto dessas ligas, considera um mesmo elemento repetido 3 vezes na base molar, reduzindo o número de elementos para 7.

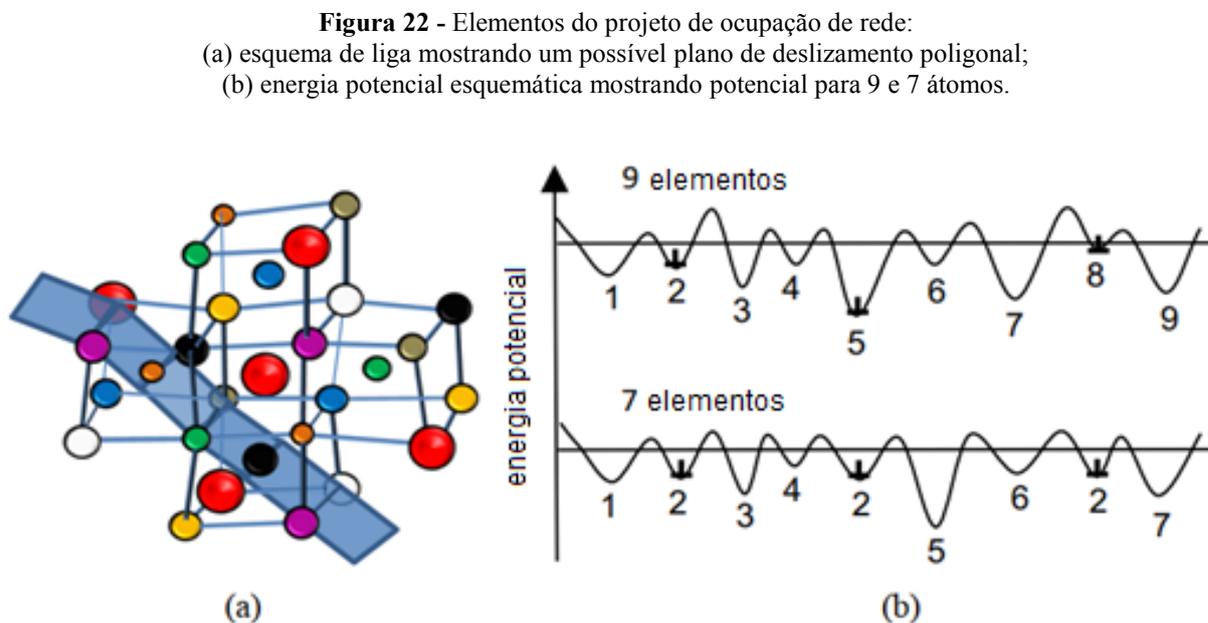
As ligas foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X, revelando que existem 2 ou 3 fases cúbicas de corpo centrado cristalinas. As ligas

fundidas e cementadas de extrema dureza foram obtidas de 1420 HV a 2507 HV. As novas ligas são os materiais metálicos mais duros conhecidos pela humanidade, com grande potencial de aplicações (GUISARD RESTIVO, 2020).

Guisard Restivo (2020) mostra em seu trabalho que o projeto de liga de ocupação reticular considera 9 átomos distintos em uma célula cúbica de corpo centrado (ccc). Diferentes elementos metálicos iriam, em princípio, apesar de outros fatores, levar a uma condição em que cada elemento metálico é coordenado por 8 átomos distintos em tamanhos e energias de ligação. Tal configuração conduz ao endurecimento pelo mecanismo de solução sólida levado ao limite. Os diferentes tamanhos atômicos na estrutura podem causar distorções severas e alteram a simetria celular. Para alcançar este recurso, a liga ideal deve ser formulada na composição equiatômica com frações molares  $x = 1/9$  para cada elemento. O projeto da liga também considera o posicionamento de cada elemento metálico adjacente segundo os seguintes critérios de ocupação de tamanho atômico sendo, pequeno (S), médio (M) e grande (L) em que: (i) As diagonais das células devem ser ocupadas por 1L + 2S ou 1L + 1M + 1S ou 3M; (ii) a posição dos átomos de L deve ser colocada nas bordas centrais ou opostas alternadas; (iii) Poucas restrições para diagonais de face devido a muito espaço.

Guisard Restivo (2020), apresenta uma configuração presumida que é esboçada na Figura 22 (a) junto com um possível plano de escorregamento ccc, que é um tipo de superfície poligonal. As barreiras para o movimento de discordâncias em tal estrutura são enormes, levando a fortes efeitos de endurecimento. O movimento de discordâncias durante a deformação da liga dá origem a mais considerações. O bloqueio do movimento da ponta do plano extra ou deslizamento dos planos mais densos com o objetivo de endurecer as ligas não precisa de um conjunto de átomos alinhados com tamanhos diferentes, mas sim uma distribuição de tamanhos desiguais, denominada flutuação das colinas energéticas. A Figura 22 ilustra este princípio mostrando uma liga com 9 elementos em comparação com 7. Os elementos 5 e 8 foram substituídos pelo elemento 2, que é repetido 2 vezes. O elemento 5 tem um poço de potencial profundo e colina íngreme para deslizamento de discordâncias, mas o elemento 8 tem um poço raso e colina energética baixa. Portanto, as substituições levariam a energias potenciais médias semelhantes ao longo do caminho de deslocamento. Deve-se observar quanto aos elementos aleatórios que a distribuição também pode ser encontrada ao longo da linha de discordância. Esta suposição assegura o endurecimento da liga e abre novas oportunidades para o projeto na direção de reduzir o número de elementos de liga. Assim, é muito conveniente, uma vez que alguns elementos metálicos são caros ou raros. Com base nesta suposição, a principal liga

testada no trabalho contém um mesmo elemento replicado 3 vezes em termos molares ( $x = 3/9$ ), onde o número total de elementos de liga é reduzido para 7.



Fonte: Guisard Restivo (2020)

Outra característica importante desse projeto de liga envolve os meios para antecipar e obrigar a formação de uma estrutura ccc por meio da seleção de elementos. A estrutura ccc é conhecida por ser mais dura do que outros tipos cfc e hcp. Qualquer que seja o diagrama de fase complexo contendo tantos elementos, pode-se promover estruturas ccc selecionando metais que normalmente se cristalizam neste sistema. Além disso, podem ser escolhidos os elementos que expandem o campo ccc em diagramas de fase conhecidos. No início, selecionando aqueles elementos com coeficientes elevados na equação de equivalente de cromo temos que quanto mais alto o coeficiente (de cromo), mais forte é o efeito de promoção do elemento para a estrutura ccc. Apesar da equação de cromo equivalente ter sido derivada para ligas à base de ferro, pode dar indicações até mesmo para ligas diluídas com Fe (GUISARD RESTIVO, 2020).

Uma equação equivalente revisada de cromo equivalente (Equação 11) foi considerada a fim de selecionar os elementos adequados para a elaboração das ligas, (S.H. RYU, AND J. YU, 1998). A partir da composição da liga projetada, o número calculado para  $C_{req}$  é a chave para forçar o material para cristalizar na estrutura CCC e aumentar a dureza. Além disso, espera-se um aumento da solubilidade sólida da maioria dos elementos de liga. Outro tipo de equação

(Equação 12) também se encaixa como um guia. É claro que os elementos V, Nb, Ti, Mo e Al, entre outros, são os melhores elementos de liga neste sentido (GUISARD RESTIVO, 2020).

$$\begin{aligned} \text{Creq (\%)} = & \text{Cr} + 0,8\text{Si} + 2\text{Mo} + 1\text{W} + 4\text{V} + 2\text{Nb} + 1,7\text{Al} + 60\text{B} \\ & + 2\text{Ti} + 1\text{Ta} - 2,0\text{Ni} - 0,4\text{Mn} - 0,6\text{Co} - 0,6\text{Cu} - 20\text{N} - 20\text{C} \end{aligned} \quad \text{Equação 11}$$

$$\begin{aligned} \text{Creq (\%)} = & \text{Cr} + 5,2\text{Si} + 4,2 \text{Mo} + 2,1\text{W} + 11\text{V} + 4,5\text{Nb} + 12\text{Al} \\ & + 7,2\text{Ti} - 3\text{Ni} - 2\text{Mn} - 40\text{N} - 40\text{C} \end{aligned} \quad \text{Equação 12}$$

Deve ser mencionado neste ponto que existe uma ampla linha de pesquisa atual que trata de ligas de vários elementos de forma semelhante, sendo também principalmente projetadas em composições equiatômicas: As Ligas de Alta Entropia (HEA). No início, o desenvolvimento de ligas presentemente mostrado não compreende diretamente análises termodinâmicas, mas sim considera que, durante o processo de fundição, as ligas não teriam tempo suficiente para a separação de fases, desde que uma taxa de resfriamento suficientemente alta seja fornecida. Deste modo, o material tende a formar solução sólida entre os elementos e distribuição homogênea na estrutura durante a solidificação, evitando assim excesso de tensões residuais. Portanto, a fundição em coquilha metálica foi especificada para a elaboração de ligas. Assim sendo, a análise de alguns parâmetros empíricos empregados em ligas de alta entropia HEA são adequados para selecionar e prever a presente composição e propriedades das ligas. (GUISARD RESTIVO, 2020).

#### 4.6 Características de matérias-primas para usinagem.

Normalmente, quando se analisa operações de usinagem, leva-se em consideração algumas propriedades como ductilidade, dureza, resistência a tração, além de outras propriedades relacionadas a microestrutura. Baixos valores de dureza permitem usinar com maiores valores de parâmetros cinmáticos (velocidade de corte e avanço) e de profundidade conseqüentemente, podendo utilizar altas taxas de remoção a menores custos (MACHADO *et al.*, 2013).

De acordo com Machado *et al* (2013), podem-se classificar de modo geral as ligas metálicas da seguinte ordem em produtividade de usinagem do mais produtivo para o menos produtivo:

- Ligas de alumínio, cobre e de magnésio;
- Aços não ligados;
- Ferros fundidos;
- Aços ligados;
- Aços inoxidáveis;
- Ligas de alta resistência térmica e mecânica.

A laminação a frio é um processo produtivo para materiais metálicos, muito usado em chapas ou barras para uniformizar a microestrutura, ou mesmo provocar endurecimento quando o material é propenso ao endurecimento por deformação. O trabalho a frio em geral, provoca o aumento de dureza devido ao encruamento do material, e proporciona uma redução na vida das ferramentas, mas também pode reduzir as rebarbas, diferente do processo de recozimento que reduz a dureza do material em um processo no qual as lamelas de cementita da estrutura perlítica são esferoidizadas provocando significativa redução da dureza aumentando assim a vida útil da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2013).

A superfície da peça também influencia na usinagem. Superfícies forjadas, muitas vezes, podem estar endurecidas, aumentando o desgaste da ferramenta da mesma forma que a presença de areia em peças fundidas podem acelerar o desgaste da ferramenta pelo fato de que a areia é abrasiva. Os elementos de liga em materiais a serem usinados são os responsáveis pela melhoria das propriedades físicas e mecânicas. No entanto esses elementos de liga os tornam difíceis de usinar (MACHADO *et al.*, 2013).

Souza (1989), diz que um aço liga é um aço que tem elementos químicos adicionados que modificam as propriedades se comparando com um aço carbono simples. A quantidade de elemento químico pode variar de milésimos a décimos por cento. O carbono é o elemento principal para aumentar a dureza e a resistência mecânica do ferro, os outros elementos mais frequentemente utilizados são: boro, vanádio, nióbio, molibdênio, cromo, manganês, silício e níquel. Considera-se um aço de baixa liga quando a composição detém de até 10 por cento de elementos de liga e o de alta liga quando a composição possui acima de 10 por cento de elementos de liga. Sendo assim um aço poderá ser categorizado em 3 categorias quanto a composição química: Aço carbono, aço de baixa liga e aço de alta liga.

#### 4.6.1 Qualidade Superficial da peça usinada e características das matérias-primas.

Deve-se dar a máxima prioridade a qualidade do produto durante o planejamento do processo. A qualidade de uma peça usinada pode ser expressa sob a forma de parâmetros geométricos (dimensão, forma, acabamento superficial, etc.), parâmetros físicos (condutividades elétrica, térmica e magnética, etc.), parâmetros químicos (resistência à corrosão, etc.) e parâmetros mecânicos (dureza, resistência à fadiga, etc.). Estes parâmetros da peça são determinados pelo projetista, de acordo com as melhores condições nas quais o produto irá funcionar. O grau de coincidência dos parâmetros reais obtidos depois que uma peça é fabricada, com os parâmetros definidos no projeto da peça, representa a qualidade da peça (FERREIRA, 2000).

O grau de coincidência entre os parâmetros macrogeométricos (dimensão e forma) de uma peça obtidos depois da usinagem, e aqueles especificados no projeto da peça, é definido como **precisão de usinagem**. O grau de coincidência entre os parâmetros micro-geométricos reais (acabamento superficial) e os parâmetros das propriedades físico-mecânicas das superfícies das peças, obtidos após a usinagem de uma peça, com aqueles especificados no projeto da peça é definido aqui como **qualidade da superfície** (FERREIRA, 2000).

Além da preocupação com as ferramentas de corte e com as possibilidades de ganho de velocidade de produção com materiais e máquinas mais eficazes, dentro da indústria de produção de peças de materiais variados, a condição final das superfícies usinadas deve ser uma meta a ser atingida por meio das condições de produção. Superfícies usinadas são resultado de um processo que envolve deformações plásticas, remoção de material por meio de cavaco, recuperação elástica posterior da peça no arrefecimento, geração de calor por vezes extrema, vibrações, tensões aplicadas sobre a peça, sobre a ferramenta e sobre a máquina e, por vezes reações químicas específicas do produto. Todos esses são fatores que podem influenciar na qualidade do produto final, e deve apresentar qualidade necessária para sua aplicação posterior, nos fins a que se destina. Dessa maneira, há entre os profissionais muita preocupação com a chamada integridade superficial, que reprova mais que a simples aparência final da superfície vista em microscópios; a expressão abrange mais, procurando-se com seu estudo conhecer as alterações superficiais, na camada mais exterior, e em camadas mais internas da peça traço alterações subsuperficiais. A integridade é um objetivo que se busca, e as variáveis envolvidas podem ser quantificadas e otimizadas buscando-se aproximar o resultado final da melhor condição possível (FRACARO, 2017, pg 101).

Fracaro (2017), relata que o resultado final de superfícies usinadas é sempre haver irregularidades, as quais podem ser: rugosidades, ondulações e falhas. No projeto de uma peça sempre deverá conter as exigências relativas ao acabamento pré-estabelecidas por análises, pois de acordo com o especificado e a necessidade do funcionamento, umas peças podem ter melhor acabamento ou não, de acordo com a aplicação.

A escolha dos parâmetros de usinagem ideais e a ferramenta correta de usinagem para cada operação de usinagem poderá amenizar essas falhas de qualidade superficial.

A rugosidade ou textura primária é formada por marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça. Essas marcas aparecem na usinagem do material com uma ferramenta de corte. Ainda é possível afirmar que a ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude, surgida por imprecisões de movimentos nos equipamentos. Os sulcos deixados pela ferramenta podem ser mensurados por diferentes parâmetros de rugosidade, (NOVALSKI, 2020).

A rugosidade é gerada pelo processo de usinagem em geral e não somente pela máquina, sendo alguns fatores que contribuem para o aumento da rugosidade, fragmentos da ponta da ferramenta ou marcas na ponta da ferramenta, restos da aresta de corte da ferramenta na superfície da peça, forma do quebra-cavacos, (MACHADO *et al.*, 2009).

#### **4.6.2 Cavacos**

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 3685:2017, o cavaco formado durante um processo de corte tem as características que estão relacionadas com o material que será usinado, o material da ferramenta, a geometria da ferramenta, a condição das arestas de corte, a posição de corte e os dados de corte e condições. Para qualquer conjunto de condições, a formação de cavacos permanecerá inalterada, a menos que um dos fatores de mudança como os mencionados neste parágrafo seja alterado.

O principal ponto em comum entre os processos de usinagem é a remoção de material e o cavaco que é o subproduto final presente em todos eles. O cavaco pode variar muito (em tipo, forma, extensão) para cada operação de usinagem, ou mesmo em uma única operação, como por exemplo o torneamento, sendo o resultado final (forma, espessura) deste, função de praticamente todas as variáveis envolvidas no processo. Quanto a sua forma os cavacos podem ser considerados em fita, helicoidal, espiral, lascas e pedaços (AMORIM, 2002).

Amorim (2002), descreve os tipos de cavaco quanto a extensão em três tipos:

1. Cavaco contínuo, caracteriza-se pelo grande comprimento, independente da forma. Ocorre principalmente na usinagem de metais dúteis (como aços baixa liga), sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte e grandes ângulos de saída da ferramenta.

2. Cavaco de cisalhamento ou parcialmente contínuo, ocorre principalmente quando a trinca, ao propagar-se pelo plano de cisalhamento, provoca a ruptura total do cavaco, que, em seguida, é soldado devido à pressão e temperatura. O resultado final costuma ser um cavaco

nem ininterrupto e uniforme nem fragmentado como o cavaco descontínuo, constituindo um meio termo entre os dois.

3. Cavaco arrancado ou descontínuo, muito comum na usinagem de metais frágeis, como ferro fundido cinzento. Este tipo de cavaco ocorre também na usinagem de alguns materiais menos frágeis a baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída pequeno.

#### **4.6.3 Dureza**

A dureza é uma propriedade mecânica importante. Na área da metalurgia, considera-se dureza como a resistência à deformação plástica permanente. Na área da mecânica, é a resistência à penetração de um material duro no outro, pois esta é uma característica que pode ser facilmente medida. O equipamento que permite a realização dessa medição se chama durômetro. O durômetro submete as peças a uma pressão definida conforme o seu material e aplica uma carga por uma mola calibrada e a profundidade de penetração define a dureza da peça. Dentre os vários ensaios de dureza o ensaio Vickers consiste em aplicar uma carga no penetrador de diamante de forma piramidal. As impressões imprimidas pelo penetrador são geometricamente similares independente da carga aplicada, (SANTOS, 2021).

No método Vickers, ao contrário do que ocorre no ensaio Brinell, as cargas podem ser de qualquer valor, pois as impressões são sempre proporcionais à carga, para um mesmo material. Deste modo, o valor de dureza será o mesmo, independentemente da carga utilizada, (SILVA, 2015).

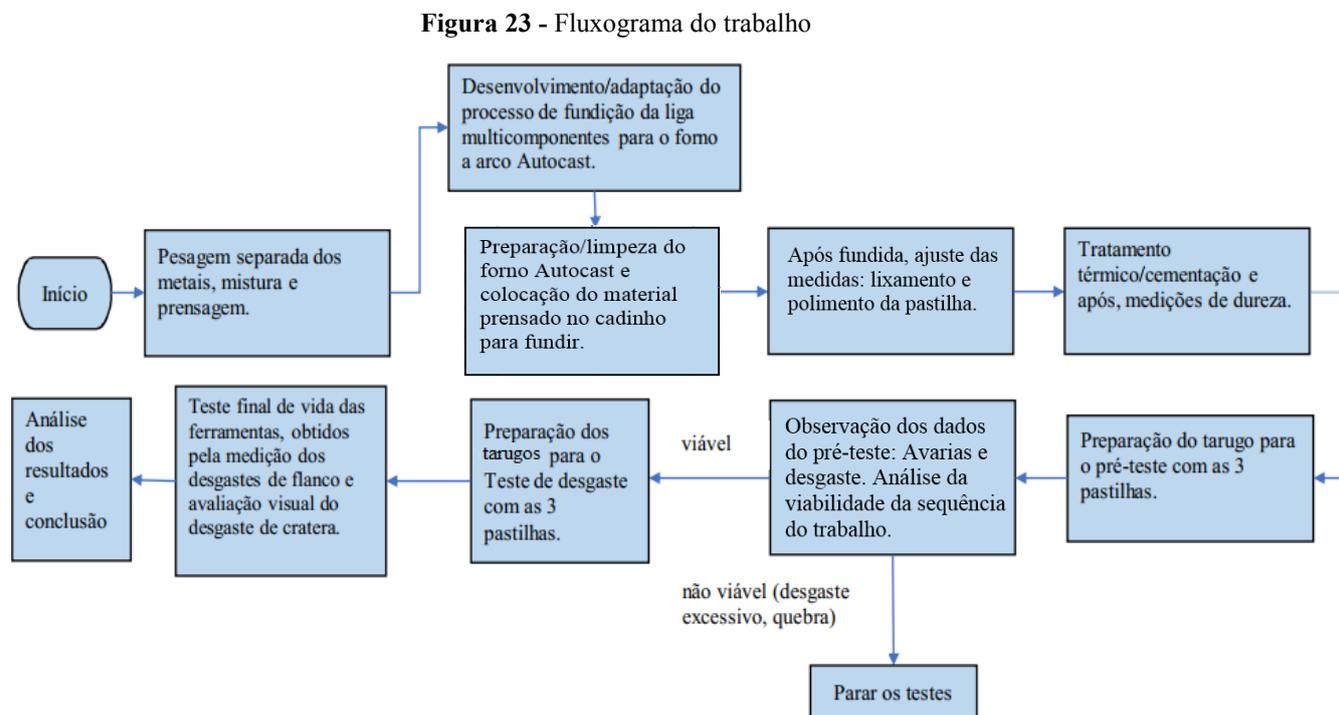
## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho, buscou por meio de pesquisa exploratória experimental, descobrir informações iniciais de uma realidade a partir um novo material para que se possa formular, posteriormente, hipóteses sobre o assunto. Pode-se afirmar que as pesquisas exploratórias têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a confirmação das mesmas (MARCONI e LAKATOS, 2003). Assim, busca entender o novo, que neste caso é pioneiro e único: A pesquisa de torneamento com o material Diamante Metálico 4C.

Esta fase experimental da pesquisa foi de suma importância para entendimento do comportamento do material Diamante Metálico 4C como ferramenta/pastilha de torneamento, e, com base nos dados qualitativos e quantitativos coletados, este trabalho poderá servir de base para outros desenvolvimentos de peças ou artefatos que exigem as características do material demonstrado neste trabalho.

## 5.1 Fluxograma da metodologia experimental

A Figura 23 mostra as etapas práticas desenvolvidas no trabalho na forma de um fluxograma.



Fonte: Própria do autor

O pré-teste de torneamento foi o primeiro teste antes do teste final. As propriedades físico-químicas do Diamante Metálico eram conhecidas mas não haviam sido testadas na forma prática. Então esse teste preliminar ou pré-teste foi uma fase importante do trabalho, forneceu dados positivos para que pudesse seguir em frente com o trabalho na confiança de alcançar um bom resultado com a pastilha experimental no teste final.

## 5.2 Ferramenta de corte de “Diamante Metálico”

A ferramenta ou pastilha de torneamento é a variável estudada neste ensaio, e de acordo com a norma ABNT NBR ISO 3685:2017 quando o material da ferramenta é a variável de ensaio, a classificação dos materiais e, se possível, a composição química, a dureza e a microestrutura devem ser anotadas no relatório de ensaio. Dessas novas ligas metálicas que foram desenvolvidas por Guisard Restivo (2020), optou-se pela liga de Diamante Metálico composição 4C por ser a de maior dureza, sendo que o significado do 4C é referente a liga 4

com o processo de fundição C, que está detalhado no item 5.3. Segue a composição química, da liga Diamante Metálico composição 4C.

**Tabela 4** - Composição das ligas em massa (%) “Diamante Metálico 4C”

Cr (%)	Fe (%)	Mo (%)	Nb (%)	Ta (%)	Ti (%)	V (%)
22,9260*	8,2063	14,1	13,654	26,9527	7,0351	7,486

Fonte: Guisard Restivo (2020)

O resultado obtido com o material “Diamante Metálico 4C” constatou uma alta dureza comparado com outros materiais como o inox 304, o aço 1020, aços de alta liga, ou mesmo metal duro (widia - WC em matriz de cobalto). Lembrando que a dureza depende do tratamento termo-químico e pode variar para mais ou menos dependendo deste. Para a comparação na Tabela 5 a liga foi cementada por 5 horas a 1150 °C e resfriada ao ar.

**Tabela 5** - Comparativo de Ensaio de dureza Vickers realizado em microdurômetro com Aços comerciais

Liga	Média (HV)	Máxima (HV)	Obs
Diamante Metálico	2129,34 ± 377,66	2507,0	Microdurômetro
Inox 304	240,0	-	Não Informado
Aço 1020	118,0	-	Não Informado
Aço de Alta Liga	410,0	-	Não Informado
Widia	1500,0	-	Não Informado

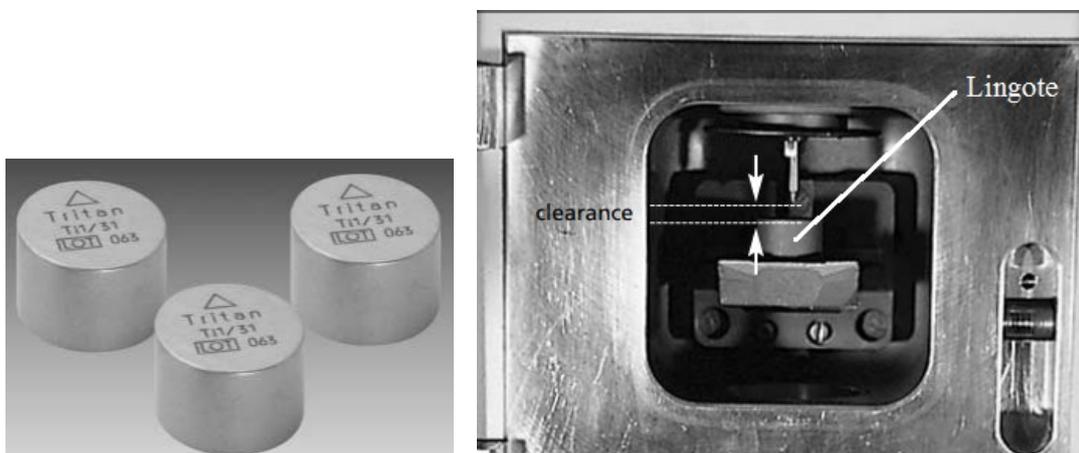
Fonte: GUIARD RESTIVO (2020); (BECCARI, 2019); (DIETER, 1997); (MIRACLE e DONALDSON, 2001), Adaptado.

### 5.2.1 Processo de prensagem dos multicomponentes

Os multicomponentes obtidos para gerar essa liga foram utilizados em forma de pó. Como a máquina de fundição Autocast utilizada foi desenvolvida originalmente para trabalhar com lingote de titânio (ver Figura 24) e opera com atmosfera de gás argônio à pressão de 5 bar na câmara superior onde está o cadinho e o eletrodo, é necessário a partir dos pós metálicos, criar uma massa prensada da liga multicomponentes, evitando que os multicomponentes em pó se espalhem no cadinho devido ao fluxo elevado de gás e possivelmente não ocorra a fundição.

**Figura 24 - Lingotes de titânio**

- a. lingotes de titânio  
b. lingote de titânio na câmara superior posicionado no cadinho da máquina de fundição Autocast em sua utilização original



a.

b.

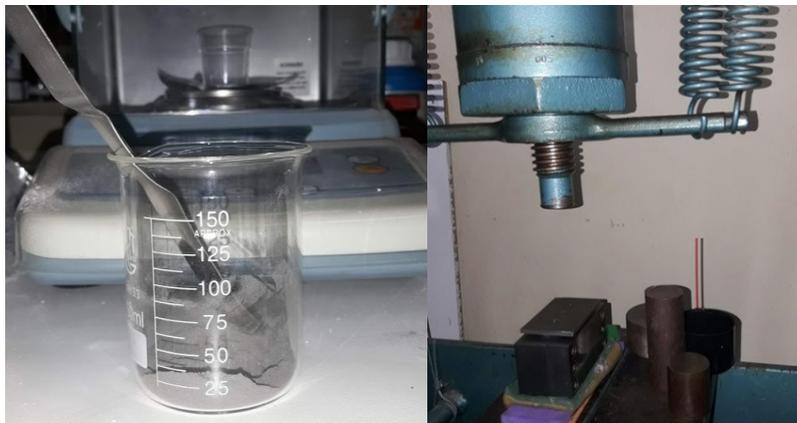
Fonte: (DENTAURUM, 2003)

**Seguindo com os procedimentos de prensagem:**

- Pesou-se cada elemento individualmente em balança analítica marca Bel precisão 0,0001 g, capacidade 210 g, modelo M214AIH, Figura 25.
- Misturou-se os pós metálicos manualmente por 5 minutos em um béquer, para homogeneizar, Figura 25.
- Após limpar e aplicar uma fina camada de líquido desmoldante na matriz, foi colocada a mistura de pós para compactar na prensa de 30 toneladas marca Ribeiro por 10 segundos no valor de 2 ton/cm<sup>2</sup> ou 6 ton por 10 segundos, gerando um lingote retangular de 10mm x 60mm x 5mm.

Após essas etapas a, b e c, o material seguiu para a fundição, Figura 25.

**Figura 25 - Becker e prensa**  
Lado esquerdo, metais pesados em balança de precisão separados sendo misturados no becker para a prensagem, lado direito prensa Ribeiro de 30t e matriz.



Fonte: Própria do autor

**Figura 26 - Molde e máquina de fundição**  
À esquerda: molde no formato da pastilha para fundição com as vedações para vácuo e a pastilha pronta  
À direita: máquina de fundição com o molde dentro.

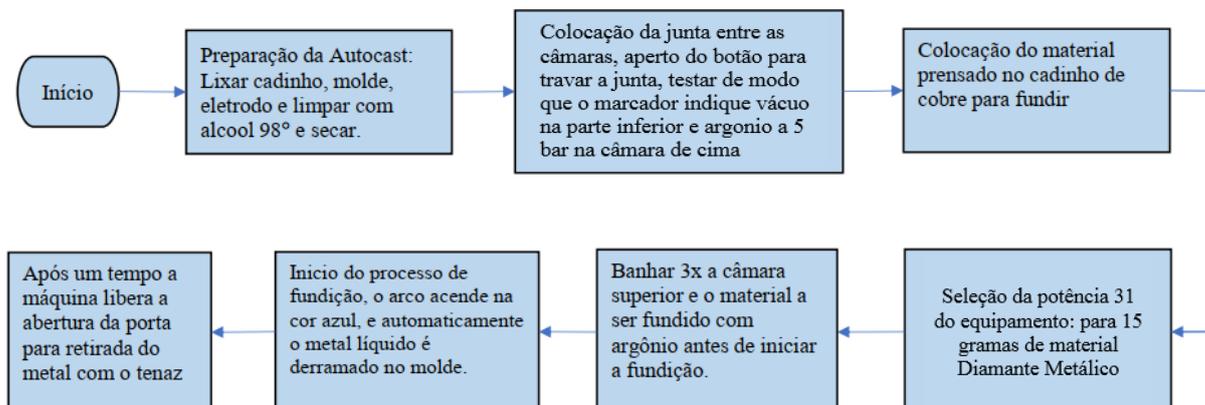


Fonte: Própria do autor

### 5.3 Fundição da liga

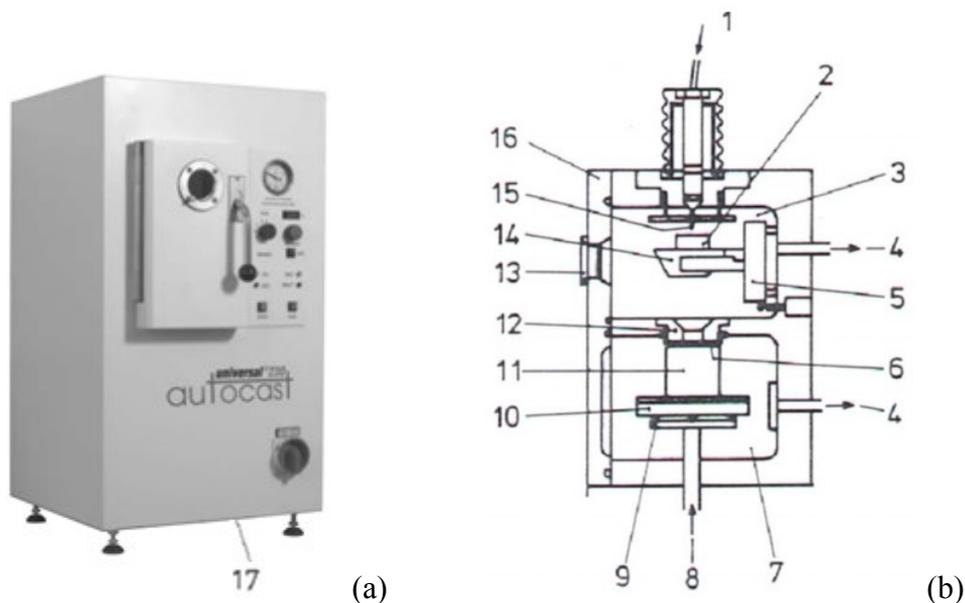
A fundição foi realizada em máquina de fusão por indução em alta frequência (Rematitan® Autocast, Dentaurum-Alemanha) equipada com arco voltaico em atmosfera de gás argônio, Figura 26 e Figura 28, conforme o fluxograma que consta na Figura 27:

**Figura 27** - Fluxograma das etapas de fundição.



Fonte: Própria do autor

**Figura 28** - Máquina de fundição e esquema representativo



Fonte: (DENTAURUM, [2003])

a – Máquina de Fundição Rematitan (Rematitan - Dentaaurum, Pforzheim – Alemanha).

b – Esquema representativo do interior da máquina de fundição, em vista lateral:

1) Entrada de gás; 2) Lingote ou pastilha prensada da liga; 3) Câmara de Fundição; 4) Tubo de evacuação de gás; 5) Suporte do cadinho; 6) Junta entre câmaras; 7) Câmara inferior (vácuo); 8) Elevador; 9) Suporte de apoio; 10) Suporte do cilindro; 11) Bloco de revestimento; 12) Abertura entre câmaras; 13) Alavanca para acesso; 14) Cadinho; 15) Eletrodo de Tungstênio; 16) Porta de acesso; 17) Bomba de vácuo.

### **5.3.1 Ajuste do processo de fundição para o novo material “Diamante metálico”**

Pelo fato de que a máquina de fundição foi desenvolvida para fundir titânio, e como sabido dos diferentes fatores como ponto de fusão e outros menos relevantes que influenciam no processo, foram realizados vários experimentos para se ter o melhor processo de fundição para o Diamante Metálico 4C. Após algumas repetidas tentativas de fundição da pastilha de Diamante Metálico 4C, o processo mais adequado à máquina de fundição foi encontrado, utilizando o material compactado pela prensa com a programação ajustada para uma pastilha de 31g de titânio precedidas de 3 purgas de argônio para evitar a oxidação e vazamento da liga metálica multicomponente no molde de cobre de cavidade quadrada 15 x 15 mm. Desta feita, denominou-se o produto consolidado de diamante metálico 4C, 4 por ser da liga 4 e C pelo processo que chamamos de “C” de fundição da máquina ser o mais adequado ao novo material e a pastilha final.

### **5.3.2 Processo de fundição**

Abriu-se o cilindro de argônio e o regulador de pressão do cilindro na válvula de parada, a pressão secundária do argônio (I) é definida em 5 bar no controle de pressão do cilindro (J), conectada a unidade à fonte de alimentação 220V e ligada a unidade no interruptor principal (D). Posiciona-se o material a fundir no cadinho de cobre, para finalizar e fechar a porta, coloca-se o suporte e a junta de vedação entre as câmaras e liga-se o botão que faz com que o cilindro da câmara superior suba e complete a vedação entre as câmaras. Fechou-se a porta da câmara (C) e aciona-se o interruptor principal e depois disso, um sinal é emitido indicando que a unidade está pronta.

Acionado o processo de fundição que ocorre através do preenchimento da câmara inferior por gás argônio em 5 bar de pressão, a fusão da pastilha foi feita através de descarga elétrica que forma um arco voltaico, até o ponto em que a pastilha está liquefeita, e então finalizada a operação, o cadinho basculou vazando o metal líquido no molde que encontra-se na parte inferior. Após a fundição, os corpos de prova foram resfriados imediatamente por meio de imersão em água corrente com a finalidade de se evitar contaminação do metal, conforme especificação do fabricante.

## **5.4 Ajuste, acabamento, polimento e cementação**

Após a fundição, a pastilha teve suas medidas ajustadas na micro retifica manual com a ajuda de paquímetro digital marca Mitutoyo 150 mm 0,01mm, lixada manualmente com lixas

de gramatura 180, 400, 600, 1000 e 1200, todas utilizadas em posições cruzadas após troca de gramatura, e por fim para polir foi utilizada a pasta de diamante grana 3 microns com flanela. Após polimento foi feito o tratamento térmico de cementação. A cementação foi realizada em cadinho fechado (cementação em caixa) a 1150 °C durante 3 horas em leito de grafite e 20 % BaCO<sub>3</sub>, seguida de resfriamento ao ar.

Vale salientar que o trabalho de ajuste e acabamento foi manual e que antes disso houve a tentativa de utilizar a retífica circular angular marca Sulmecanica, Figura 29, gentilmente cedida pela empresa Techfer Ferramentas. A tentativa de uso da retífica resultou em dano a pastilha de usinagem, provavelmente devido a vibração do equipamento. E por não ter outro meio e recurso de máquina, optou-se pelo ajuste manual.

**Figura 29 - Retífica e pastilha**

À esquerda, Retífica usinando a pastilha.

À direita, Pastilhas para torneamento feita do material diamante metálico com cantos quebrados provavelmente pela vibração da retífica.



Fonte: Própria do autor

#### 5.4.1 Cementação

O processo de cementação foi feito em 1150 °C por 3 horas em leito de grafite com 20% BaCO<sub>3</sub>, seguido por resfriamento ao ar.

**Figura 30 - Pastilhas no processo de cementação**



Fonte: Própria do autor

## **5.5 Condições do corpo de prova tarugo**

Pela norma ABNT NBR ISO 3685:2017, a princípio, para os ensaios, fica livre a escolha dos materiais de trabalho de acordo com os próprios interesses da pesquisa. Recomenda-se que as informações referentes ao material de trabalho sejam apresentadas no relatório como: classe, composição química, propriedades físicas, microestrutura, dureza, detalhes do processamento do material, (por exemplo, laminado a quente, forjado, fundido ou trefilado) e qualquer tratamento térmico. Para que seja possível posteriormente uma comparação de resultados, é recomendável que os corpos de prova sejam adquiridos na quantidade de material relativamente suficiente para cobrir essa necessidade que por acaso ocorra.

### **5.5.1 Condições padrão para o corpo de prova tarugo**

A norma ABNT NBR ISO 3685:2017, prevê algumas condições padrão para a peça ou corpo de prova a ser usinado:

- a) Toda carepa de laminação ou casca residual de fundição deve ser removida antes do ensaio, exceto quando o efeito da superfície bruta estiver sendo ensaiado.
- b) A superfície do canto deformada plasticamente e qualquer outra superfície anormal encruada na peça (corpo de prova), deve ser removida com uma ferramenta de limpeza afiada antes do ensaio a fim de reduzir as deformações residuais da superfície. No entanto isso não inclui a remoção da superfície de trabalho normalmente endurecida para teste.
- c) A relação entre comprimento e diâmetro da peça não pode ser maior que 10.
- d) A dureza do material de trabalho deve ser determinada ao longo da seção transversal completa ao final de cada barra ou tubo.

### **5.5.2 Material do corpo de prova tarugo ABNT/SAE 8640**

Para os ensaios do teste da pastilha de “Diamante metálico”, optou-se pelo torneamento cilíndrico externo, e para tal, foram utilizados dois corpos de prova de formato cilíndrico do material de aço liga laminado sem tratamento ABNT/SAE 8640 com dureza externa de 230 HB, gentilmente doado pelo grupo Gerdau. As dimensões iniciais são: 250 mm de comprimento x 76 mm de diâmetro. O aço liga ABNT/SAE 8640 é o aço de médio carbono e baixa liga mais utilizado para fabricação de componentes mecânicos. Possui alta resistência mecânica, boa usinabilidade, alta tenacidade, elevada temperabilidade e baixa soldabilidade.

Tabela 6 - Composição química do aço liga ABNT/SAE 8640

Composição química de corrida, aço ligado (%)						
Designação COPANTdo aço	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)
8640	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25

Fonte: Adaptado da ABNT NBR NM 87:2000

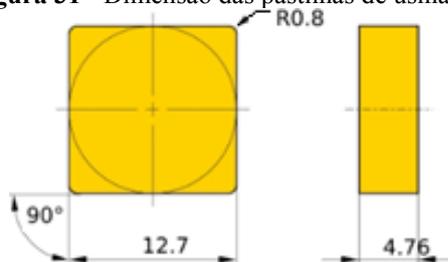
## 5.6 Teste de torneamento

Esse teste consiste em usar externamente o tarugo para gerar dados de comparação entre as ferramentas de usinagem. Os ensaios de usinagem seguiram a metodologia da norma NBR ISO 3685.

Os ensaios de torneamento ocorreram no laboratório de inovação STHEMDA Lab., localizado na Uniso. O torno utilizado foi o torno convencional Clever modelo CO632.

A ferramenta para comparação é a pastilha tipo P10 e P30 da marca Tungaloy que é ideal para aço, aço fundido, aço inoxidável e aço liga que é o nosso caso. O modelo é o SNGN 120408 tipo BA 55 (sem revestimento), Figura 31. A pastilha de Diamante Metálico tem as mesmas dimensões. As pastilhas foram utilizadas com suporte tipo grampo modelo Dssnr grampo que pode trabalhar com pastilha tipo P sem furo, Figura 32. Foi feito um teste preliminar para confirmar se a pastilha de Diamante metálico 4C seria viável e posteriormente houve o teste final para determinação de vida da ferramenta.

Figura 31 - Dimensão das pastilhas de usinagem



Fonte: Mitsubishi Materials

**Figura 32** - Suporte Para Torno tipo grampo modelo Dssnr



Fonte: Própria do autor

**Figura 33** - Teste de torneamento



Fonte: Própria do autor

### **5.7 Pré-teste de viabilidade da pastilha Diamante Metálico 4C**

Este pré-teste ou teste preliminar foi de extrema importância a este trabalho, foi feito com a intenção de conhecer o desempenho da pastilha de Diamante metálico 4C no torneamento, visto que é um material único que nunca havia sido colocado em teste, portanto, antes do teste preliminar não era possível afirmar com certeza que a ferramenta experimental de Diamante Metálico 4C poderia ser utilizada em torneamento. O teste preliminar foi crucial para ter a certeza que era plenamente possível seguir em frente com este trabalho. Para a geração das imagens de desgaste foram utilizadas na bancada no momento da usinagem o microscópio usb, marca BWX, Modelo FX-500. Para o teste preliminar foi utilizado o mesmo tarugo para testar as 3 pastilhas. Partindo de um diâmetro de 70,28 mm com uma velocidade de corte de 300 m/min, avanço de 0,5 mm/revolução, com profundidade de corte variando de 0,25 a 1 mm. Todos os passes foram sem refrigeração.

## **5.8 Teste final: Ensaios de vida das ferramentas de corte**

Realizou-se os ensaios de vida para o cálculo do comprimento total usinado e tempo de vida para cada uma das 3 ferramentas testadas e comparou-se o desempenho de usinagem de cada uma no torneamento. O ensaio de vida consistiu em usinar trechos da peça de 130 mm de comprimento linear, retirar a ferramenta do torno a cada 3 passes, leva-los até o microscópio na bancada e realizar a medição do desgastes de flanco (**Vb**) e a observação do desgaste de cratera. A condição limite de vida adotada nas ferramentas foi o valor de  $Vb \text{ máx.} = 0,800 \text{ mm}$ , ou seja, os ensaios de vida com as ferramentas foram interrompidos antes do desgaste de flanco atingir  $VB = 0,800 \text{ mm}$  a fim de evitar a quebra da aresta de corte e a queda da qualidade da usinagem.

Para cada uma das 3 pastilhas foram feitas as 3 etapas conforme tabela 8, são 3 tarugos distintos do mesmo material da mesma corrida de produção.

Considerou-se o comprimento total usinado e tempo de vida de cada uma das ferramentas testadas.

Todos os testes foram sem refrigeração e os 3 tarugos tiveram sua rugosidade superficial medidas com o rugosímetro digital marca Insize.

### **5.8.1 Equipamentos utilizados**

Torno Marca Clever modelo CO632

Microscópio BWX, Modelo FX-500

Rugosímetro digital marca Insize

### **5.8.2 Materiais utilizados no torneamento**

Tarugo preparado, diâmetro 75 mm x 130mm de comprimento.

Pastilhas: P10, P30 e “Diamante Metálico 4C”.

### **5.8.3 Normalização do tarugo**

A norma ABNT NBR ISO 3685:2017, prevê algumas condições padrão para a peça ou corpo de prova a ser usinado, como uma pré-usinagem para eliminação da carepa superficial. A medida preparada para o ensaio: diâmetro de 75 mm x 130 mm de comprimento.

Observação: Para essa preparação de eliminação de carepa superficial do tarugo foi utilizada uma quarta pastilha para que não houvesse interferência no teste.

### 5.9 Dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 1, durômetro Buehler 5100 series

Algumas indentações foram feitas no IPEN. O método consiste na penetração do corpo de prova, neste caso as pastilhas P10, P30 e de “Diamante Metálico” 4C. Foi utilizado o equipamento da marca Buehler 5100 series. Os valores foram obtidos diretamente no durômetro que tem um microscópio ótico acoplado.

### 5.10 Dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 2, análise das imagens com o MEV

Após feitas as identações e para confirmar as medidas, foram também analisadas as imagens com o auxílio do MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura do laboratório LAFINAL da UNISO e empregada a equação:

$$\text{Dureza Vickers} \left[ \frac{kg}{mm^2} \right] = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} (HV) \quad \text{Equação 14}$$

Onde F é a carga de indentação em kgf e d é a médias entre as 2 diagonais da impressão horizontal e vertical em mm. As medidas a seguir são dadas em mícron e convertidas em mm.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram organizados mostrando, primeiramente, os resultados das medições de dureza para o corpo de prova ABNT SAE 8640, Tabela 7, submetido aos ensaios de torneamento. A seção 6.2 trata do resultado do teste preliminar de viabilidade da pastilha Diamante Metálico 4C, a seção 6.3 é referente ao teste final e mostra os ensaios de vida das ferramentas de corte e a análise das rugosidades dos tarugos submetidos ao teste final.

### 6.1 Dureza do corpo de prova tarugo 8640

O tarugo utilizado é de aço 8640 laminado e normalizado, sem tratamento térmico de endurecimento. Para a medição da dureza do corpo de prova, foi utilizado o equipamento da marca Mede Instrumentos de Medição modelo ISH NR 150 que fica no laboratório de materiais da Uniso.

**Tabela 7** - Medição de dureza do corpo de prova

Medição	Dureza (HRC)
1	35
2	35
3	39
4	34,5
5	36,5

Média das medições: 36 HRC

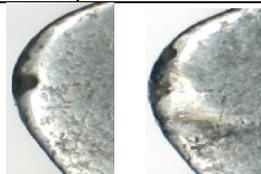
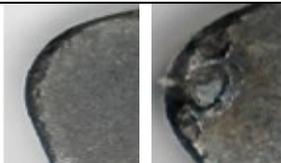
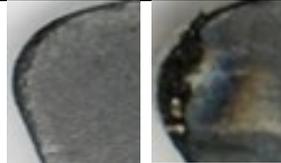
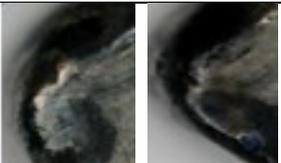
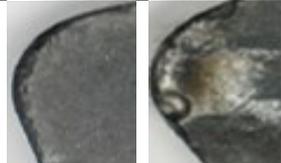
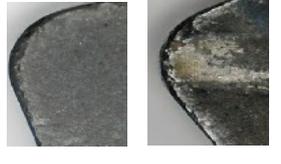
Fonte: Própria do autor

Observação: A dureza média encontrada no tarugo é maior do que aquela informada no catálogo do fornecedor Gerdau: 280 HRB (catálogo) contra 36 HRC = 331 HRB (medida).

## 6.2 Resultado do teste preliminar de viabilidade da pastilha Diamante Metálico 4C

Tabela 8 com os valores dos diâmetros do tarugo e pastilhas utilizadas na usinagem. Todas usinagens foram executadas com 100 mm de comprimento no tarugo e sem refrigeração. Todas as arestas utilizadas eram novas.

**Tabela 8** - Dados do teste preliminar – Imagens microscópio usb, FX-500

	Pastilha	Diâmetro inicial (mm)	Diâmetro final (mm)	Velocidade de Corte (m/min)	Profundidade de corte Ap (mm)	Avanço (mm/rev.)	Desgaste de cratera, imagens antes e depois, utilizando arestas novas em cada passe.
a)	D. M. 4C 1ª Fusão	70,28	69,78	300	0,25	0,5	
b)	Metal duro P30	69,78	69,6	300	0,25	0,5	
c)	Metal duro P30	69,6	69,25	300	0,5	0,5	
d)	D. M. 4C 1ª Fusão	69,25	69,2	300	0,5	0,5	
e)	D. M. 4C 1ª Fusão	69,2	69,05	300	0,5	0,5	
f)	Metal duro P30	69,05	68,67	300	1	0,5	
g)	Metal duro P10	75	73,2	300	0,5	0,5	

Fonte: Própria do autor

### **6.2.1 Resultados dos testes preliminares**

Observa-se que o material Diamante Metálico 4C nas configurações de usinagens aplicadas neste teste rendeu um bom resultado perante suas oponentes P10 e P30. Deve-se levar em consideração a dificuldade em compará-los pois trata-se da comparação de materiais diferentes e um terceiro bem diferente fabricado quase que artesanalmente por fundição a arco como foi o Diamante Metálico 4C. Os fatores como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte respectivamente são os fatores que promovem a maior relevância quanto aos danos ocorridos nas pastilhas de torneamento, por isso no teste preliminar foi torneado variando a profundidade de corte para testar a resistência da aresta de corte da pastilha Diamante Metálico 4C. O teste preliminar foi essencial para que fosse seguido em frente com o teste final para o ensaio de vida das ferramentas de corte, pois mostrou o potencial da pastilha de torneamento Diamante Metálico 4C, que obteve menos desgaste de cratera que as pastilhas P10 e P30.

## **6.3 Teste final: Ensaio de vida das ferramentas de corte**

### **6.3.1 Teste de desgaste de flanco**

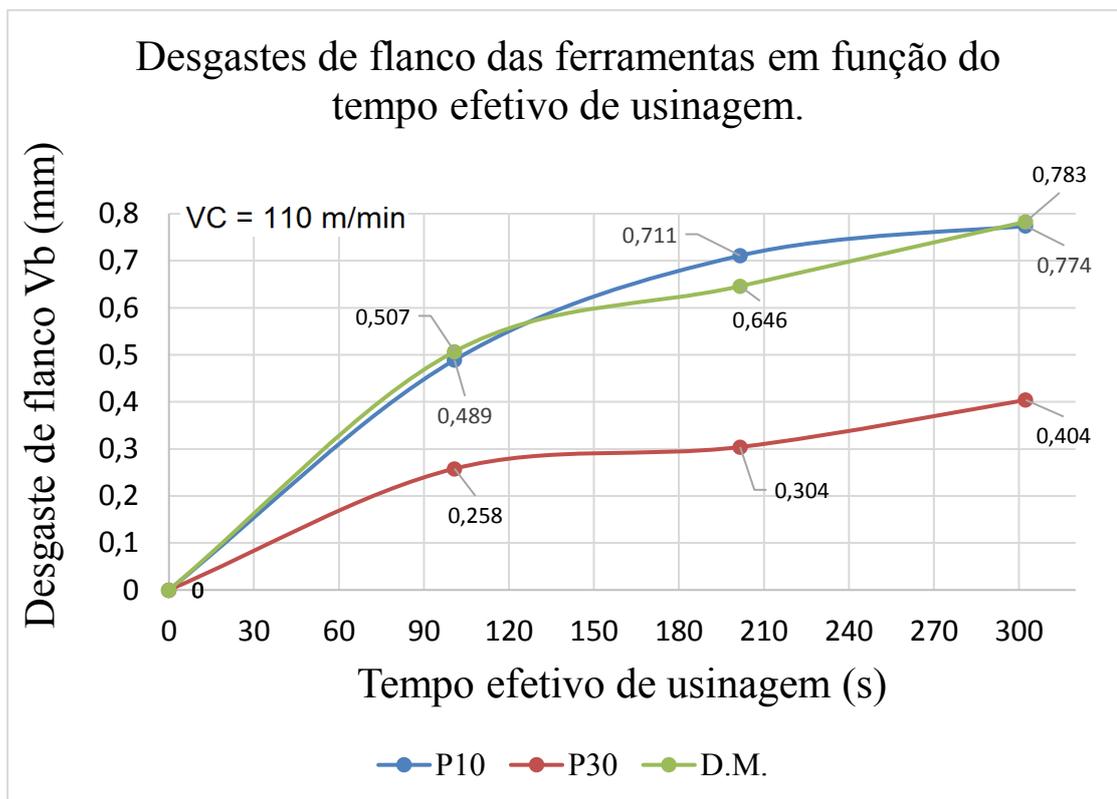
Os resultados dos testes de vida para as ferramentas de metal duro P10, metal duro P30 e a pastilha experimental Diamante Metálico 4C podem ser vistos no gráfico 1 e 2, bem como os dados da operação de usinagem por etapa constam na Tabela 9. Os tempos de vida das ferramentas são os valores máximos do tempo efetivo de usinagem. Foi estabelecido pelo mesmo critério adotado para a obtenção do comprimento total de usinagem, até que a ferramenta chegasse no máximo de  $VB = 0,800$  mm de desgaste de flanco.

**Tabela 9** - Dados da operação de usinagem por etapa

<b>Parâmetros</b>	<b>Pastilhas testadas no torneamento externo</b>		
	<b>P10</b>	<b>P30</b>	<b>D.M.</b>
Diâmetros (mm) do tarugo	75	75	75
RPM	460	460	460
Avanço (mm/rev)	0,5	0,5	0,5
Comprimento de corte $l_f$ (mm)	130	130	130
Profundidade de corte (mm)	0,25	0,25	0,25
Refrigeração	não	não	não
Tempo por passe (s)	33,6	33,6	33,6
Número de passes	9	9	9
Medição de desgaste e avarias	cada 3 passes	cada 3 passes	cada 3 passes
Medição de rugosidade superficial Ra, (após 9 passes)	4,101	4,905	5,469

Fonte: Própria do autor

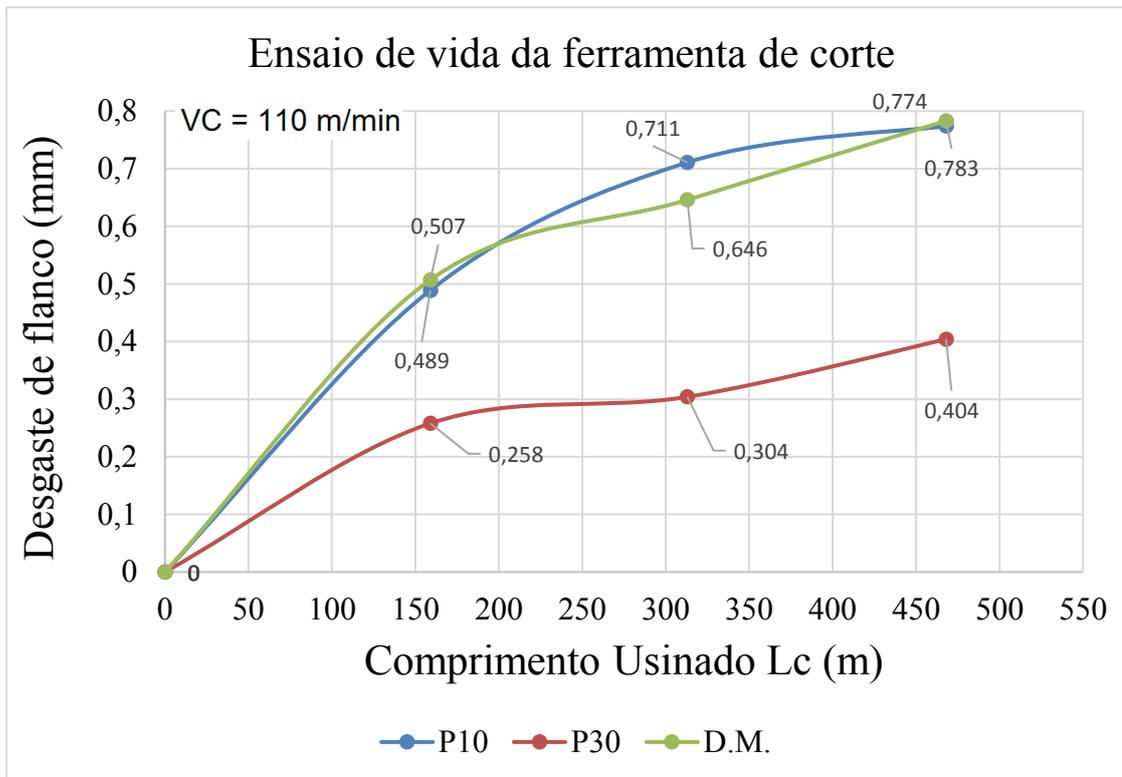
Gráfico 1 - Ensaio de vida da ferramenta de corte pelo tempo efetivo de usinagem



Fonte: Própria do autor

Os tempos de vida das ferramentas são os valores máximos do tempo efetivo de Usinagem com base no Vb máx. de 0,8 mm. No comparativo do gráfico 1, observa-se que a P10 e Diamante metálico tiveram uma durabilidade parecida, por volta de 302 segundos ou 5,04 minutos, enquanto que a pastilha P30 teve um melhor desempenho para os mesmos 302 segundos, o seu desgaste de flanco não passou de 0,404 mm.

Gráfico 2 - Ensaio de vida das ferramentas de corte por metro.



Fonte: Própria do autor

A análise do desgaste de flanco  $V_b$  foi relacionada com o percurso de corte ( $L_c$ ). O valor de  $L_c$  foi calculado através da Equação 13.

$$L_c = \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f} \quad \text{Equação 13}$$

Onde  $D$  é o diâmetro da peça em mm,  $L_f$  é o percurso de avanço em mm,  $f$  é o avanço em mm/rev e  $L_c$  é o percurso de corte dado em m.

O teste pelo percurso de corte foi finalizado quando as pastilhas P10 e Diamante Metálico 4C chegaram no limite do desgaste de flanco. Como nos mostram os gráficos 1 e 2, houve um desempenho bem próximo de fim de vida entre as duas sendo 0,774 mm de desgaste para a pastilha P10 e 0,783 mm de desgaste para a pastilha Diamante Metálico 4C, ambas as 3 usinaram 468 m de percurso de corte. A pastilha P30 teve o melhor desempenho de desgaste de flanco entre as 3 análises, pois nos mesmos 468 m de percurso de corte ela desgastou apenas 0,404 mm no flanco contra o desgaste de 0,774 mm da P10 e 0,783 mm da Diamante Metálico 4C.

### 6.3.2 Desgaste de profundidade de cratera

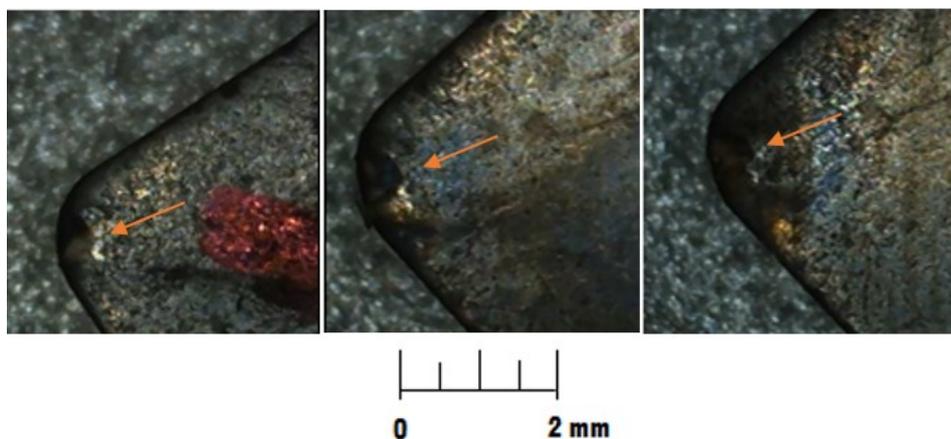
A formação dos cavacos com os 3 modelos de pastilha deu-se em forma de fita, contínuo e longo devido ao material usinado ser dúctil de baixa liga e o modelo das pastilhas não possuir quebra cavacos. Não houve alteração do cavaco durante esta etapa de teste de início ao fim para as 3 pastilhas, o que indica que foi usinado sem ultrapassar a vida da ferramenta. Algumas desvantagens nesse formato de cavaco é o alto volume gerado e risco de acidentes com o operador do torno. Este tipo de cavaco em fita causou o desgaste excessivo na superfície de saída da ferramenta colaborando com a análise do desgaste de cratera ver Figuras 35, 36 e 37.

**Figura 34** - Cavacos longos em forma de fita



Fonte: Própria do autor

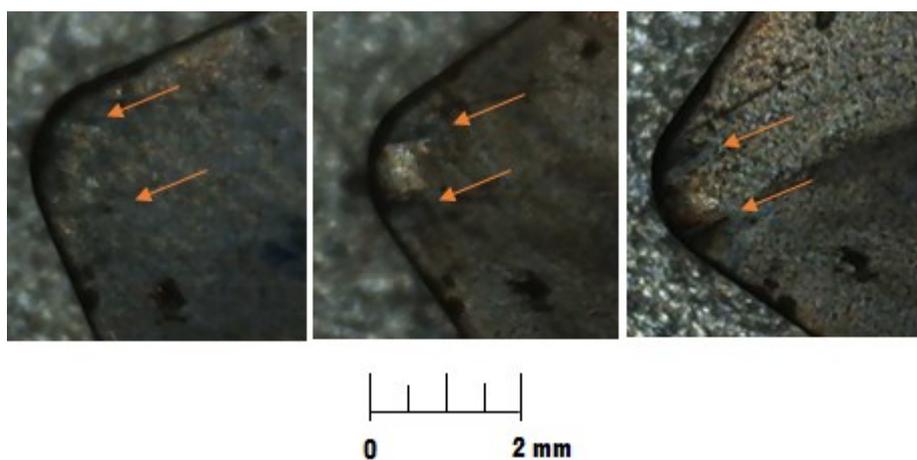
**Figura 35** - Desgaste de cratera da pastilha P10 com 3, 6 e 9 passes de torneamento



Fonte: Própria do autor

Na Figura 35 pode-se ser observado da esquerda para a direita o desgaste progressivo de cratera da pastilha P10 nas medições de 3, 6 e 9 passes de usinagem.

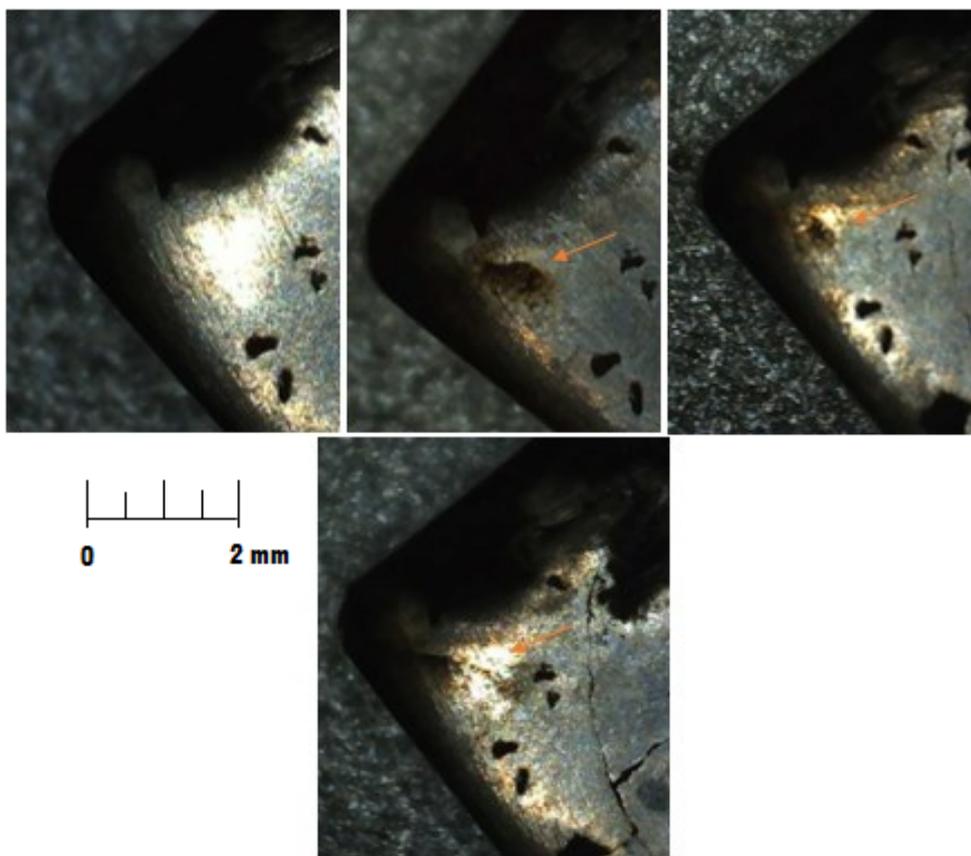
**Figura 36** - Desgaste de cratera da pastilha P30 com 3, 6 e 9 passes



Fonte: Própria do autor

Na Figura 36 pode-se ser observado da esquerda para a direita o desgaste progressivo de cratera da pastilha P30 nas medições de 3, 6 e 9 passes de usinagem e ao comparar a figura 35 com a figura 36 pode-se observar que na P30 o desgaste de cratera foi menor.

**Figura 37** - Desgaste de cratera na pastilha de Diamante metálico 0, 3, 6 e 9 passes



Fonte: Própria do autor

Para o Diamante Metálico 4C foi necessário colocar a primeira imagem à esquerda o zero passe de torneamento para que ficasse claro e não confundisse desgaste de cratera com os defeitos superficiais da fundição. Observa-se na figura 37 um desgaste de cratera bem mais suave do que o desgaste de cratera das pastilhas P10 e P30 nas figuras 35 e 36, desgaste esse que na pastilha de Diamante Metálico 4C, localizou-se longe da aresta de corte o que é uma boa vantagem, pois quanto mais a cratera for distante da aresta de corte menor será a interferência desse desgaste na durabilidade da ferramenta.

#### **6.4 Dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 1, durômetro Buehler 5100 series**

Algumas indentações foram feitas no IPEN. O método consiste na penetração do corpo de prova, neste caso as pastilhas P10, P30 e de Diamante Metálico 4C. Os valores foram obtidos diretamente no durômetro que tem um microscópio óptico acoplado, Tabela 10.

Tabela 10 - Comparação das durezas das pastilhas.

**Medição com equipamento da marca Buehler 5100 series**

	<b>Diamante Metálico 4C</b>	<b>P30</b>	<b>P10</b>
<b>Medição</b>	<b>Dureza (HV) kgf/mm<sup>2</sup></b>	<b>Dureza (HV) kgf/mm<sup>2</sup></b>	<b>Dureza (HV) kgf/mm<sup>2</sup></b>
1	1781	1310	1674
2	1582	1257	1555
3	2219	1461	1635
4	2226	1310	1529
5	1732	1523	1544
6	2098		1691
7	1442		1667
8	2078		1799
9	1485		1417
10	1546		1317
<b>Média (HV)</b>	1818,9	1372,2	1582,8
<b>Desvio Padrão (HV)</b>	309,83	113,62	141,38
<b>Desvio Padrão (%)</b>	17,03	8,28	8,93

Fonte: Própria do autor

Analisando a Tabela 10, entre as 3 pastilhas que foram medidas a dureza, a pastilha de Diamante Metálico 4C foi a que teve a maior dureza com a média de 1818,9 HV contra 1583,8 HV da P10 e 1372,2 HV da P30. O desvio padrão da pastilha de Diamante Metálico 4C (17,03 %) foi mais alto que o desvio padrão da P10 e P30, que indica maior dispersão nos dados, provavelmente pelo processo de produção do Diamante Metálico não ter sido por um processo industrial consolidado e com equipamentos mais adequados. Quanto a dureza do Diamante Metálico 4C ainda havia a possibilidade de aumento da dureza se fosse ajustado o processo de tratamento térmico de cementação. Para este trabalho optamos por uma cementação realizada em cadinho fechado (cementação em caixa) a 1100 °C durante 3 horas em leito de grafite e 20 % BaCO<sub>3</sub>, seguida de resfriamento ao ar.

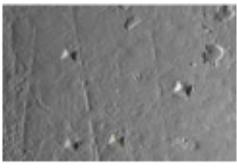
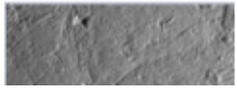
### 6.5 Valores de medição da dureza das pastilhas ensaiadas, Etapa 2, análise das imagens com o MEV para conferência

Após feitas as identificações e para confirmar as medidas, foram também analisadas as imagens com o auxílio do MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura do laboratório LAFINAL da UNISO e empregada a equação:

$$\text{Dureza Vickers} \left[ \frac{kg}{mm^2} \right] = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} (HV) \quad \text{Equação 14}$$

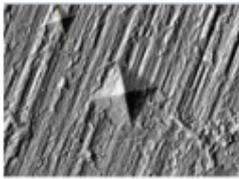
Onde F é a carga de indentação em kgf e d é a médias entre as 2 diagonais da impressão horizontal e vertical em mm, Tabela 11, 12 e 13. As medidas a seguir são dadas em micron e convertidas em mm.

Tabela 11 - Resultado das durezas pelo MEV Diamante metálico 4C

Durezas obtidas através do MEV e da equação 14					Indentações	
DM 4C	Indentação	Carga aplicada	Medidas das identações (em microns )	Dureza HV	1	  
	1	1 kg	Horizontal: 34,726 Vertical: 33,692	1584,6		
	2	1 kg	Horizontal 37,039 Vertical 38,146	1312,2		
	3	1 kg	Horizontal 29,04 Vertical 31,004	2053,7		
	4	1 kg	Horizontal 35,694 Vertical 32,844	1579		
	5	1 kg	Horizontal 32,317 Vertical 32,861	1746	2	
<b>Média (HV)</b>				<b>1655,1</b>	Observação: Imagem 1: Indentação 1 a 4, da esquerda para a direita, de cima para baixo. Imagem 2: Indentação 5.	
<b>Desvio Padrão (HV)</b>				<b>271,79</b>		
<b>Desvio Padrão (%)</b>				<b>16,42</b>		

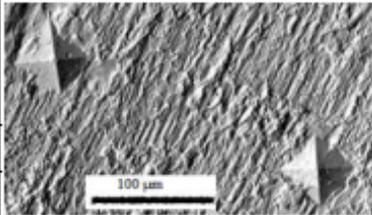
Fonte: Própria do autor

Tabela 12 - Resultado das durezas pelo MEV P10

Durezas obtidas através do MEV e da equação 14					Indentações	
P10	1	0,2 kg	Horizontal 15,917 Vertical 16,419	1418,8	 	
	2	1 kg	Horizontal: 34,574 Vertical: 37,204	1439,7		
<b>Média (HV)</b>				<b>1429,25</b>		
<b>Desvio Padrão (HV)</b>				<b>14,78</b>		
<b>Desvio Padrão (%)</b>				<b>1,03</b>		

Fonte: Própria do autor

Tabela 13 - Resultado das durezas pelo MEV P30

Durezas obtidas através do MEV e da equação 14					Indentações	
P30	1	3 kg	Horizontal: 71,148 Vertical: 74,270	1052,3	 	
	2	3 kg	Horizontal 66,359 Vertical 68,844	1217,3		
<b>Média (HV)</b>				<b>1134,8</b>		
<b>Desvio Padrão (HV)</b>				<b>116,67</b>		
<b>Desvio Padrão (%)</b>				<b>10,28</b>		

Fonte: Própria do autor

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada nas amostras a fim de confirmar as medições de durezas realizadas anteriormente pelo durômetro **Buehler 5100 series**.

A média das medições de dureza pelo MEV deu-se em valores menores nas 3 pastilhas de usinagem. A pastilha Diamante Metálico 4C por exemplo teve a média pelo MEV de 1655,1 HV contra a dureza de 1818,9 HV, obtido pelo durômetro Buehler 5100 series, uma diferença de 9 %, o desvio padrão da Diamante Metálico 4C manteve-se alto e bem parecido nas duas etapas de medições sendo que para o durômetro **Buehler 5100 series** as amostras mostraram um desvio padrão de 17,03 % contra um desvio de 16,42 % pelo MEV confirmando uma maior dispersão nos dados.

A pastilha P10 teve a média da dureza pelo durômetro **Buehler 5100 series** de 1582,8 HV contra 1429,25 HV pelo MEV, uma diferença de 9,7 %, o desvio padrão da P10 pelo MEV foi de 1,03 % contra 8,93 % atingido pelo durômetro Buehler 5100 series. Por fim a P30 teve a média da dureza pelo durômetro **Buehler 5100 series** de 1372,2 HV contra 1134,8 HV pelo MEV, uma diferença de 17,3 %, o desvio padrão da P10 pelo MEV foi de 10,28 % contra 8,28 % atingido pelo durômetro Buehler 5100 series.

As medidas do durômetro Buehler 5100 series são as mais confiáveis pois foram as que mais se aproximaram das medidas encontradas na literatura. Para a P10 a medida mencionada na literatura é de 1600 HV e para a P30 1450 HV.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizados neste trabalho a fundição e preparação da pastilha de torneamento do material multicomponentes Diamante Metálico 4C, bem como seus ajustes de processo de produção durante essa prática, medição das durezas dos materiais para teste, o estudo do torneamento cilíndrico externo com as pastilhas em comparação, a análise de seus desgastes e ensaio de vida e a comparação do desempenho das ferramentas.

Quanto ao processo de produção da pastilha de torneamento, utilizamos um forno de fundição que inicialmente foi desenvolvido pelo seu fabricante para fundir titânio. Então, para fundir os multicomponentes do Diamante Metálico 4C, houve necessidade de adaptações do processo, por meio de tentativas e erros, foi criado um processo adequado a essa nova liga. Para que a fundição fosse completa, o melhor resultado foi de 15 gramas de multicomponentes compactados em forma de lingote que é a medida necessária para gerar a pastilha, e na máquina de fundição programou-se como se fosse na potência para 31 gramas de titânio, além do mais, na câmara superior da máquina de fundição onde é inundado de argônio a pressão de 5 bar, o resultado de 3 purgas de argônio obteve o melhor resultado contra a oxidação da liga que contém alguns componentes que oxidam facilmente. Entre o molde de alumínio e o de cobre, o molde de cobre gerou o melhor resultado de fundição da pastilha devido as características de condução de temperatura do cobre.

Entre P10, P30 e Diamante Metálico 4C, os materiais de cada pastilha são diferentes um dos outros, sendo o Diamante Metálico 4C muito diferente em material e em processo por ser fundido em forno a arco enquanto a P10 e P30 são obtidos pela metalurgia do pó. A realização de uma comparação de desempenho entre os diferentes tipos de insertos de usinagem utilizados é complexa, sendo que os fatores que mais influenciam o desgaste da ferramenta são a velocidade de corte seguida pelo avanço e a profundidade de corte.

Nas medições de dureza, o resultado obtido da pastilha de Diamante Metálico 4C, constatou que o nível de dureza do material é alto, comparado com outros materiais como o inox 304, o aço 1020, aços de alta liga, ou mesmo metal duro (widia - WC em matriz de cobalto). Sua dureza em média é bem maior que a dureza da pastilha de metal duro P30 (por volta de 30% mais dura que a P30), é maior que a dureza da pastilha de metal duro P10 (por volta de 12% mais dura que a P10).

Outro ponto positivo da pastilha Diamante metálico 4C é que em sua composição não tem o cobalto amplamente utilizado na composição do metal duro, um material altamente tóxico e que sua produção pode em breve entrar em colapso devido a diversos fatores.

Quanto ao teste de desgaste de flanco, a pastilha de Diamante Metálico e a pastilha P10 tiveram resultados muito parecidos, enquanto se obteve um desempenho bem próximo de fim de vida entre as duas sendo 0,774 mm de desgaste para a pastilha P10 e 0,783 mm de desgaste de flanco para a pastilha Diamante Metálico 4C, onde ambas as 3 usinaram 468 m de percurso de corte. A pastilha P30 teve o melhor desempenho de desgaste de flanco entre as 3 análises, pois nos mesmos 468 m de percurso de corte ela desgastou apenas 0,404 mm no flanco, provavelmente a pastilha P30 teve o melhor resultado de desgaste de flanco nas condições utilizadas na usinagem porque a maior ductilidade da P30 auxiliou diminuindo a abrasão e impacto ao flanco no torneamento.

Apesar do teste de vida ser pelo desgaste de flanco, o desgaste de cratera suave na pastilha de Diamante Metálico 4C indicou que ela é resistente ao atrito e que não houve reação química entre o material da peça e o material da ferramenta.

O trabalho cumpriu com o objetivo de avaliar o potencial de uso da liga multicomponentes fundida como ferramenta de corte e demonstrou viabilidade para seguir adiante com pesquisas e desenvolvimento de ferramentas. A ferramenta de Diamante Metálico 4C usinou de igual para igual com a pastilha P10, e por fim, surge como uma boa opção para futuramente substituir ou concorrer com as aplicações das pastilhas P10 e P30 sem cobertura com a vantagem de não utilizar o cobalto.

#### **Sugestões para Trabalhos Futuros:**

Testar o Diamante Metálico em outras operações de usinagem de torneamento.

Desenvolver ou aplicar uma camada superficial no Diamante Metálico semelhante as usadas nas pastilhas comerciais e compará-lo com pastilhas de usinagens comerciais com camada superficial CVD (chemical vapour deposition).

Testar o Diamante Metálico em outras operações de usinagem geral como fresamento, brochagem, brocas de furação.

Melhorar o processo de fundição para eliminar vazios e manchas observadas nas amostras.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 513**: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas - Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro ABNT: 2013

ABNT. **ABNT NBR ISO 3685**: ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT. **ABNT NBR NM 87**: aços carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ANGELO, P.C.; SUBRAMANIAN, R., **Powder Metallurgy: science, technology and applications**, Eastern Economy; PHI: Connaught Circus, Nova Deli, India, 2009.

ALMEIDA, Paulo Samuel. **Processos de Usinagem**: utilização e aplicações das principais máquinas operatrizes, São Paulo, Érica, 2015. Disponível em:

[https://books.google.com.br/books?id=FYuwDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=m%C3%A1quinas+para+usinagem&hl=ptBR&sa=X&ved=0ahUKEwi5\\_7X85pznAhUIH7kGHWOaDg8Q6AEIKTAA#v=onepage&q=torno%20vertical&f=false](https://books.google.com.br/books?id=FYuwDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=m%C3%A1quinas+para+usinagem&hl=ptBR&sa=X&ved=0ahUKEwi5_7X85pznAhUIH7kGHWOaDg8Q6AEIKTAA#v=onepage&q=torno%20vertical&f=false)

Acesso em: 24 jan. 2020

BECCARI, Rafael Fonseca. **Projeto e Caracterização de Ligas Multi-elementares**. 2019.

Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) – Universidade de Sorocaba, Sorocaba, 2019. Disponível em:

<http://pta.uniso.br/documentos/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Rafael%20Fonseca%20Beccari.pdf>

Acesso em: 28 maio 2020.

COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Eraldo Janonne da. **Materiais para ferramenta de corte em usinagem**. 2018. Disponível em:

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5357586/mod\\_resource/content/1/8%20-%20Materiais%20para%20ferramentas%20de%20corte.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5357586/mod_resource/content/1/8%20-%20Materiais%20para%20ferramentas%20de%20corte.pdf)

Acesso em: 05 fev. 2021.

COMO escolher corretamente o inserto de torneamento. **Sandvik Coromant**, 2021.

Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx> Acesso em 21/01/2021

DA SILVA, Leonardo Roberto *et al.* Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga “waspaloy”. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, p. 109-114, 5 abr. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rem/v57n2/v57n2a07.pdf>  
Acesso em: 19 fev. 2020.

DELLA ROSA, Henrique Vicente; ALVES, Atecla Nunciata Lopes. Monitorização biológica na exposição ocupacional ao cobalto, aspectos toxicológicos e analíticos associados a um sistema de qualidade. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbcf/v39n2/03.pdf>  
Acesso em: 02 dez. 2020

DENTAURUM (Alemanha). **Autocast universal® 230 Casting System: Instructions for use**. Stand 1.9. 03. ed. atual. Ispringen: Dentaurem, [2003?]. 90 p. Disponível em: <https://www.dentaurum.de/files/989-895-20.pdf> Acesso em: 3 jul. 2020.

DIETER, G.E. - **ASM Handbook Materials Selection and Design** - Volume 20, ASM International Handbook Committee, 1997.

DINIZ, A. D., MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.: **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 5. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

FERRARESI, Dino - **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1970, 18ª. Reimpressão 2018.

FERREIRA, JCE. **Precisão e Erros de Usinagem**. Florianópolis, 2000. Disponível em: [http://www.grima.ufsc.br/capp/apostila/Cap2ApostCAPP\\_v2.pdf](http://www.grima.ufsc.br/capp/apostila/Cap2ApostCAPP_v2.pdf)  
Acesso em: 18 mar. 2020.

FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. Curitiba: Intersaberes, 2017. Disponível em:

<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/128237/pdf/102>

Acesso em: 15 fev. 2020.

GABALDO, Sander; PRADO, Júlio. **Usinagem sem segredos**. 2010. Disponível em:

<http://usinagemsemsegredos.blogspot.com/2010/12/metal-duro-o-metal-duro-e-o-mais.html>

Acesso em: 09 fev. 2021.

GONÇALVES, André da Motta. **Usinabilidade do carbeto de tungstênio no torneamento com ferramenta de diamante**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -

USP, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18146/tde-17042010-090833/es.php>

Acesso em: 29 out. 2019.

GRIMA. In: CNC - **Comando numérico controlado: desgaste de ferramentas**. Florianópolis: UFSC, 2015. Disponível em:

[http://www.grima.ufsc.br/cnc/transparencias/usinagem/Aula7\\_DesgasteDeFerramentas\\_v1.pdf](http://www.grima.ufsc.br/cnc/transparencias/usinagem/Aula7_DesgasteDeFerramentas_v1.pdf)

Acesso em: 10 jul. 2017.

GUERRA, Mateus; MOSCON, Lara. Veículos elétricos e a difusão de novas baterias. **GESEL - Grupo de estudos do setor elétrico: Informativo Eletrônico Mobilidade Elétrica**, Rio de Janeiro. Disponível em:

[http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/52\\_moscon2.pdf](http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/52_moscon2.pdf).

Acesso em: 8 mar. 2021.

GUISARD RESTIVO, Thomaz Augusto; RESTIVO, Gustavo Marques Guisard, **Desenvolvimento de Ligas de Dureza Extrema por Projeto de Ocupação de**

**Malha**. Disponível em SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3639787> ou

<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3639787>

Acesso em 30 nov. 2020.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física – Eletromagnetismo**. 6ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2012.

JOSÉ AMORIM, Heraldo. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3791>  
Acesso em: 23 jan. 2020.

KANYANTA, Valentine. **Microstructure Property Correlations for Hard, Superhard, and Ultrahard Materials**. 1. ed. atual. Oxfordshire: Springer, 2016. 244 p.

KELSEY Galantich, ‘**Lithium-ion Batteries: How to Improve Due Diligence Guidelines to Ensure the Environmental Health of Artisanal Cobalt Mining Communities in the Democratic Republic of Congo**’, 15/1 Law, Environment and Development Journal (2019), p. 32, available at <http://www.lead-journal.org/content/19032.pdf>

KEIICHI, Tsuda. **History of Development of Cemented Carbides and Cermet**. Sei technical review, Tóquio, 2016. Disponível em:  
<https://globalsei.com/technology/tr/bn82/pdf/82-03.pdf>  
Acesso em: 20 mar. 2020.

KIMINAMI, Claudio S.; CASTRO, Walman B. e OLIVEIRA, Marcelo F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**, São Paulo, Blucher, 2013. 236 p.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina DE Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LIJUN ZHANG, Qing Chen. **CALPHAD-Type Modeling of Diffusion Kinetics in Multicomponent Alloys**. Handbook of Solid State Diffusion, [s. l.], v. 1, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/cemented-carbide>  
Acesso em: 20 mar. 2020.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais I**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

MENDES, J. Amado. **O Ferro na História: Das Artes Mecânicas às Belas-artes**, Coimbra, Imprensa da Universidade de Coimbra, 2009. 318 p.

MIRACLE, D.B.; DONALDSON, S.L. - **ASM Handbook** Vol 21, International Handbook Committee. pg. 2504, 2001.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo, Edgard Blucher, 2020, 253 p.

<https://books.google.com.br/books?id=AKfMDwAAQBAJ>  
acesso em 05 mar. 2021

PARANHOS FILHO, Moacir – **Gestão da Produção Industrial**, Curitiba: Ibplex, 2007, 340 p.

PEREIRA LEANDRO, Marcio; VERNEY, José Carlos Krause de. **Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de carboneto de tungstênio (metal duro) com revestimento PVD na usinagem do aço SAE 1050** [s. l.], v. 21, ed. 38, p. 77-85, 2018. DOI 2236-6733. Disponível em:

<http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/694/464>

Acesso em: 4 out. 2019

PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO - ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE DOCENTE SENAI-RJ. **Parâmetros de corte**. Módulo tornearia mecânica, Rio de Janeiro, 2019.

Disponível em:

[https://perdiamateria.eng.br/Mecanismos/TORNEARIA%20parametro%20de%20corte%20061%20A%20076%20\\_%204.pdf](https://perdiamateria.eng.br/Mecanismos/TORNEARIA%20parametro%20de%20corte%20061%20A%20076%20_%204.pdf)

Acesso em: 27 jan. 2020.

REBEYKA, Claudimir José, **Princípios dos processos de fabricação por usinagem**, 2016, Curitiba. Editora InterSaberes

ROCCA, J. E. **Processos de Usinagem: Utilização e Aplicações das Principais Máquinas Operatrizes**. São Paulo: Érica - Saraiva Educação S.A. 2015 - Disponível em <https://books.google.com.br/books?id=FYuwDwAAQBAJ&pg=PT27&dq=torneamento&hl=ptBR&sa=X&ved=0ahUKEwjitOG76rflAhWPGLkGHUwRBYcQ6AEIRjAE#v=onepage&q&f=false>

Acesso em 29 de OUT de 2019,

SANDVIK-COROMANT., 2003. **Ferramentas para torneamento** (Catálogo Técnico). São Paulo

SANTOS, G.A. **Tecnologias Mecânicas: Materiais, Processos e Manufatura Avançada**

São Paulo: Érica - Saraiva Educação S.A. 2021 296 p. - Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=9jwIEAAAQBAJ>

Acesso em 05 mar. 2021

SANTOS, Vanice dos; CANDELORO, Rosana J.. **Trabalhos acadêmicos: uma orientação para a pesquisa e normas técnicas**. Porto Alegre: Age, 2006. 149 p. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=REvrU90M2OUC&pg=PA43&dq=revis%C3%A3o+bioblog%C3%A1fica&hl=pt-BR&sa=X&pli=1#v=onepage&q&f=false>

Acesso em: 10 fev. 2021.

S.H. Ryu, and J. Yu, **A New Equation for the Cr Equivalent in 9 to 12 Pct Cr Steels**, *Met. and Mat. Trans. A*, Vol. 29A (1998) 1573-1578.

SILVA, Angelus Giuseppe Pereira da; ALVES JUNIOR, Clodomiro. **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização**. *Cerâmica*, São Paulo, v. 44, n. 290, p. 225-232, dez. 1998. Disponível em

<https://doi.org/10.1590/S0366-69131998000600004>

Acessos em 17 mar. 2020.

SILVA, Angelus Giuseppe Pereira da; ALVES JUNIOR, Clodomiro. **Teoria de sinterização por fase sólida; uma análise crítica de sua aplicação**. *Cerâmica*, São Paulo, v. 44, n. 289, p. 171-176, Oct. 1998 . Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69131998000500004>

Acesso: 23 Apr. 2020.

SILVA, Bruno Filipe Bronze da. **Aquisição por Visão Artificial e Medição Automática de Micro Dureza Vickers**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2015. Disponível em: [https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/8020/1/DM\\_BrunoSilva\\_2015\\_MEIM.pdf](https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/8020/1/DM_BrunoSilva_2015_MEIM.pdf) acesso em 05 mar. 2021

S. MAGI, Luzdalva. **80 Invenções que mudaram o mundo**. São Paulo: Discovery Publicações, 2019. 96 p. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=qxSJDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=qxSJDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 22 jan. 2020.

SMITH, William F.; HASHEM, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5ª edição. Porto Alegre: AMGH Editora, 2010

SOUZA, Sérgio Augusto de - **Composição Química dos Aços**. 1ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 144p.

STEMMER, C. E.; **Ferramentas de Corte, Florianópolis**, Ed. UFSJ, 2005. 249p.