

CENTRO UNIVERSITÁRIO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
IVAN SILVA LEMOS

**ANÁLISE DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE FERRAMENTAS DE HSS,
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO E INSERTOS DE CBN NA USINAGEM DE AÇO
SAE 1045**

Varginha
2019

IVAN SILVA LEMOS

**ANÁLISE DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE FERRAMENTAS DE HSS,
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO E INSERTOS DE CBN NA USINAGEM DE AÇO
SAE 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Sul de Minas como pré-requisito para a obtenção de grau de bacharel sob a orientação do Prof. Esp. Sidnei Pereira e Prof. Me. Carlos Roberto Ribeiro.

**Varginha
2019**

IVAN SILVA LEMOS

**ANÁLISE DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE FERRAMENTAS DE HSS,
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO E INSERTOS DE CBN NA USINAGEM DE AÇO
SAE 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof.

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho a todos aqueles que
contribuíram para a sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas, professores, minha família e todos aqueles que puderam me auxiliar na realização deste trabalho.

“Os obstáculos são aquelas coisas terríveis que você vê quando desvia os olhos do seu objetivo.”

Henry Ford

RESUMO

Este trabalho é um estudo de caso que visa definir qual o efeito do procedimento mais comum de usinagem de metais nas ferramentas mais utilizadas nesse processo. Estas ferramentas são predominantemente de aço rápido (HSS), carboneto de tungstênio e insertos de nitreto cúbico de boro (CBN). Os testes serão realizados em um determinado número de corpos de prova padronizados em composição e medidas, tudo realizado em uma única máquina. Neste contexto, a pesquisa tem por objetivo estudar o desgaste apresentado em cada material de ferramenta na operação de desbaste longitudinal em um processo de usinagem. Com isso pôde-se concluir que a ferramenta de CBN apresenta as características mais adequadas para a usinagem do aço 1045, uma vez que não mostrou sinais de desgaste e um acabamento superficial de ótima qualidade nos corpos de prova usinados por ela.

ABSTRACT

This paper is a case study that aims to define the effect of the most common metal machining procedure on the most used tools in this process. These tools are predominantly high speed steel (HSS), tungsten carbide and cubic boron nitride (CBN) inserts. The tests will be performed on a number of standardized specimens in composition and measurement, all performed on a single machine. In this context, the research aims to study the wear presented in each tool material in the longitudinal roughing operation in a machining process. Thus, it can be concluded that the CBN tool has the most suitable characteristics for the machining of 1045 steel, since it showed no signs of wear and an excellent surface finish on the specimens machined by it.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Quadro com os materiais para ferramentas de corte utilizados atualmente. | 6 |
| Figura 2 – Formato e partes de uma ferramenta de HSS padrão. | 8 |
| Figura 3 - Esquema dos ângulos que influenciam nos parâmetros..... | 11 |
| Figura 4 – Desgaste de flanco em uma ferramenta de corte do tipo inserto..... | 15 |
| Figura 5 - Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte do tipo HSS. | 16 |
| Figura 6 - Desgaste de cratera visto na superfície de ataque de uma ferramenta de corte. | 16 |
| Figura 7 – Efeito do encruamento na vida útil da ferramenta de corte em materiais com processo a frio e a quente. | 18 |
| Figura 8 - Um dos corpos de prova usinados no experimento. | 18 |
| Figura 9 - Durômetro utilizado no ensaio de dureza da amostra do material usinado. | 19 |
| Figura 10 – Amostra retirada no material para análise de dureza. | 20 |
| Figura 11 – Torno Nardini utilizado no estudo. | 21 |
| Figura 12 – Placa com os dados do motor elétrico que alimenta o torno utilizado..... | 22 |
| Figura 13 – Quadro com as rotações disponibilizadas pela máquina..... | 22 |
| Figura 14 – Exemplar real utilizado no estudo em seu respectivo suporte. | 23 |
| Figura 15 – Representação da ferramenta pelo <i>site</i> da ISCAR. | 24 |
| Figura 16 – Exemplar real utilizado no estudo..... | 24 |
| Figura 17 – Esquema de dimensões da ferramenta utilizada..... | 25 |
| Figura 18 – Desenho com dimensões da ferramenta. | 25 |
| Figura 19 – Representação da ferramenta utilizada pela Mitsubishi..... | 26 |
| Figura 20 – Exemplar real da ferramenta utilizada no estudo..... | 26 |
| Figura 21 – Esquema de dimensões da ferramenta utilizada..... | 26 |
| Figura 22 – Imagem da ponta da ferramenta de aço rápido antes dos testes realizados. | 30 |
| Figura 23 – Imagem ampliada da pastilha de carboneto de tungstênio antes do ensaio. | 30 |
| Figura 24 – Imagem da ponta da ferramenta de CBN antes dos ensaios. | 31 |
| Figura 25 – Primeiros desgastes na aresta de corte do bits de aço rápido..... | 32 |
| Figura 26 – Ponta da ferramenta de aço rápido ao fim da usinagem do primeiro e único corpo de prova no qual foi utilizado. | 33 |
| Figura 27 – Desgaste da ponta do inserto de carboneto de tungstênio após os estudos..... | 34 |
| Figura 28 – Ponta de corte após a usinagem dos três corpos de prova..... | 35 |
| Figura 29 – Superfície da peça usinada pela ferramenta de aço rápido ao fim do estudo..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 – Imagem ampliada da superfície da peça usinada pela ferramenta de aço rápido.. | 36 |
| Figura 31 – Superfície da peça usinada pela ferramenta de carboneto de tungstênio ao fim do estudo..... | 37 |
| Figura 32 – Imagem ampliada da superfície da peça usinada pela ferramenta de aço rápido.. | 37 |
| Figura 33 – Superfície da peça usinada pela ferramenta de carboneto de tungstênio ao fim do estudo..... | 38 |
| Figura 34 – Imagem ampliada da superfície da peça usinada pela ferramenta de CBN ao fim do estudo..... | 38 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parte da tabela de classificação e composição dos aços rápidos segundo o AISI. ... | 8 |
| Tabela 2 – Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513 (2004)..... | 10 |
| Tabela 3 - Formato do inserto de CBN segundo catálogo Mitsubishi. | 12 |
| Tabela 4 - Ângulos de folga e seus respectivos caracteres na nomenclatura da ferramenta. ... | 13 |
| Tabela 5 - Classes de tolerâncias das ferramentas de corte e suas respectivas letras representativas na nomenclatura da ferramenta de corte (G ou M)..... | 13 |
| Tabela 6 - Tabela indicativa da nomenclatura de acordo com a forma de fixação e o quebra-cavaco da ferramenta. | 14 |
| Tabela 7 - Tabela com as condições de corte de acordo com cada classe de ferramenta..... | 14 |
| Tabela 8 – Dados técnicos referente ao torno utilizado nos estudos. | 21 |
| Tabela 9 - Características da ferramenta de CBN utilizada..... | 27 |
| Tabela 10 – Tabela de velocidade de corte para operações de torneamento. | 27 |
| Tabela 11 – Tabela de avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça..... | 29 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 FERRAMENTAS DE CORTE | 5 |
| 2.1 Materiais para Ferramentas..... | 5 |
| 2.1.1 Aço Rápido | 7 |
| 2.1.2 Metal Duro | 9 |
| 2.1.3 Nitreto Cúbico de Boro..... | 10 |
| 2.2 Geometria das Ferramentas | 11 |
| 2.3 Desgastes e Avarias em Ferramentas de Corte..... | 15 |
| 2.3.1 Desgaste Frontal ou de Flanco | 15 |
| 2.3.2 Desgaste de Entalhe | 16 |
| 2.3.3 Desgaste de Cratera | 16 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 17 |
| 3.1 Determinação do Material a Ser Usinado | 17 |
| 3.2 Ensaio de Dureza | 19 |
| 3.3 Máquina-Ferramenta Utilizada no Estudo | 21 |
| 3.4 Ferramentas Comparadas Durante o Estudo | 23 |
| 3.4.1 Aço Rápido | 23 |
| 3.4.2 Metal Duro | 24 |
| 3.4.3 Metal Ultraduro | 25 |
| 3.5 Processo de Usinagem do Corpo de Prova | 27 |
| 3.6 Medição do Desgaste da Ferramenta..... | 29 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 31 |
| 4.1 Orçamento Inicial do Ferramental | 31 |
| 4.2 Desgaste das Ferramentas | 32 |
| 4.3 Tempo de Usinagem | 35 |
| 4.4 Acabamento Superficial..... | 35 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 39 |
| REFERÊNCIAS | 40 |

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais difundidos na indústria metalúrgica atualmente. É um processo bastante prático em relação a outros processos e possui inúmeras vantagens, principalmente no que se refere a tolerâncias dimensionais.

Até por volta do século XVIII, o principal material utilizado na fabricação de peças era a madeira, salvo algumas exceções onde se utilizava aço-carbono. Apenas mais tarde, com a revolução industrial é que surgiram tecnologias que utilizam água e vapor na geração de energia é que foi possível evoluir a indústria do Metalmeccânica e proporcionar o surgimento de máquinas-ferramentas, além do aparecimento de novos materiais como ligas de aço mais resistentes (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Hoje, dentre os materiais mais utilizados nas ferramentas de usinagem estão o aço rápido (HSS), o carboneto de tungstênio e o nitreto cúbico de boro (CBN), sendo esse último utilizado em forma de insertos intercambiáveis. Cada uma apresenta diferentes parâmetros como, por exemplo, a velocidade de corte, profundidade máxima de corte e desgaste, parâmetros que afetam diretamente no tempo de usinagem e no acabamento da peça.

Por questões de características e propriedades dos materiais, algumas ferramentas acabam por apresentar uma diferença, muitas vezes, considerável nos custos de aquisição e, pelo mesmo motivo, apresenta também certas discrepâncias na taxa de desgaste e durabilidade das ferramentas.

Por este motivo é de suma importância o conhecimento dos custos gerados nesta produção, inclusive aqueles relacionados a ferramenta utilizada no processo. Visto que as ferramentas mais utilizadas nos processos de usinagem de metais são as de aço rápido (HSS), carboneto de tungstênio e insertos de nitreto cúbico de boro (CBN), é essencial saber qual delas apresenta a melhor relação entre o custo e o benefício considerando fatores relacionados tanto ao custo direto da ferramenta, quando a sua durabilidade, tempo de usinagem e qualidade do produto final.

O objetivo do estudo é analisar o custo-benefício dos diferentes materiais de ferramenta em operações comuns de usinagem do aço 1045 levando em consideração todas estas características mencionadas.

Realizando operações de usinagem em alguns corpos de prova analisando a taxa de desgaste e levando em conta o custo de aquisição da ferramenta é possível alcançar uma conclusão satisfatória a respeito de quais dessas ferramentas oferecem ao operador e ao cliente

a melhor qualidade possível ao menor custo, fornecendo de forma equilibrada todas estas características e parâmetros previamente citados.

O estudo de caso será realizado seguindo alguns pretextos e uma certa sequência de passos que consistem, primeiramente, na definição dos padrões a serem seguidos no que se referem ao corpo de prova e parâmetros de usinagem. Em seguida o estudo é feito seguindo os padrões previamente determinados e os parâmetros recomendados de acordo com o tipo de ferramenta e as dimensões do corpo de prova. Finalmente os dados são recolhidos e analisados para, enfim, definir qual apresenta o maior equilíbrio entre as características e propriedades.

2 FERRAMENTAS DE CORTE

A usinagem é definida como o processo de fabricação que utiliza da remoção de material de uma superfície para conferir a forma desejada de uma peça. Visto isto, pode-se concluir que o material da ferramenta deve possuir uma dureza maior que o material a ser usinado (FRACARO, 2017).

Esta é a premissa básica de uma ferramenta de corte, porém, existem outras propriedades complementares que podem ser decisivas na hora da escolha da ferramenta correta (REBEYKA, 2016).

As ferramentas de corte teoricamente ideais devem possuir os seguintes requisitos: (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015):

- a) Alta dureza;
- b) Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- c) Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- d) Alta resistência à compressão;
- e) Alta resistência ao cisalhamento;
- f) Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- g) Alta resistência ao choque térmico;
- h) Alta resistência o impacto;
- i) Ser inerte quimicamente.

Em resumo pode-se dizer que a ferramenta ideal é aquela que possui o perfeito equilíbrio entre dureza e tenacidade (FRACARO, 2017). Porém, como estas são propriedades antagônicas a obtenção desse equilíbrio não é tão simples. Este tipo de relação só pode ser alcançado mediante intensa pesquisa por parte dos fabricantes de ferramentas, produzindo materiais com diferentes composições químicas, diferentes refinamentos de grãos e diversificados tratamentos térmicos (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

2.1 Materiais para Ferramentas

O principal fator determinante das propriedades de uma ferramenta de corte é o material que a compõe. O que ocorre é que as propriedades ideais para uma ferramenta não se reúnem um único tipo de material. Existe uma certa priorização de determinada propriedade por parte

de cada material o que torna mais ou menos apropriado para determinado tipo de operação e determinado tipo de material a ser usinado (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Existe, na indústria da usinagem, uma constante busca por melhorias na questão de materiais. Partindo da ideia de que a usinagem consiste na remoção de material, há um incessante aperfeiçoamento das ferramentas de corte que são possíveis graças ao avanço no campo da engenharia dos materiais e o surgimento de novas ligas metálicas com notáveis propriedades (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Figura 1 – Quadro com os materiais para ferramentas de corte utilizados atualmente.

| | |
|---|--|
| 1 Aço carbono: | |
| • Comum | |
| • Com elementos de liga | |
| 2 Aço semirrápido (baixo W) | |
| 3 Aços rápidos (fundido ou por metalurgia do pó) | |
| • Sem revestimento | |
| • Com revestimento | |
| 4 Aço super-rápido (elevado teor de V) | |
| 5 Ligas fundidas | |
| 6 Metal duro | |
| • Classe P | |
| • Classe M | |
| • Classe K | |
| • Classe N | |
| • Classe S | |
| • Classe H | |
| 7 Cermets | |
| 8 Cerâmicas | |
| • À base de Si_3N_4 | |
| • À base de Al_2O_3 | |
| • Pura | |
| 9 Ultraduros | |
| • CBN - PCBN | |
| • PCD | |
| 10 Diamante natural | |

Fonte: MACHADO; ABRÃO, *et al.* (2015)

Na figura 1 é possível ver os principais materiais para ferramentas de corte conhecidos e utilizados na indústria da usinagem atualmente. Estes materiais, como estão indicados no quadro, estão dispostos em ordem crescente em relação a dureza e resistência ao desgaste e, conseqüentemente, em ordem decrescente em relação a sua tenacidade e resistência a impactos.

Pode-se notar uma certa divisão de diferentes classes de ferramenta quanto a sua dureza. São essas classes os aços carbono que se subdividem em comum e ligados, os aços semirrâpidos, que possuem um pequeno teor de tungstênio, os aços rápidos, que podem ter ou não revestimento, algumas ligas metálicas fundidas, os metais duros, as quais também podem ter ou não revestimento, os *cermets* que são materiais mistos de metal e cerâmica, as ferramentas cerâmicas, que podem ser a base de sílica ou de óxido de alumínio, os materiais ultraduros e por fim o diamante natural. Esses materiais estão sequenciados do mais tenaz ao mais duro.

Todos eles possuem alguma aplicabilidade, porém, hoje em dia, é possível notar uma certa frequência maior de utilização de certos tipos de matérias. Por exemplo, em trabalhos que não exigem elevada dureza da ferramenta, geralmente opta-se por usar uma ferramenta de aço rápido, ao passo que quando se exige alguma dureza mais elevada, opta-se por utilizar as ferramentas de carboneto de tungstênio. Existe também os casos em que os operadores optam por utilizar uma ferramenta de CBN, pois a associam a uma maior durabilidade.

A seguir será discorrido mais a respeito destas ferramentas com enfoque especial para as mais utilizadas.

2.1.1 Aço Rápido

Nos primórdios da usinagem as ferramentas de corte eram basicamente compostas apenas por aços ao carbono com algum tipo de tratamento térmico que elevasse a sua dureza. Este cenário foi comum até a virada do século XIX para o século XX, quando Frederick Taylor e Maunsel White desenvolveram um novo material que elevou a velocidade de corte em cerca de dez vezes o natural para época, motivo pelo qual recebeu o nome de aço rápido ou, em inglês, *High Speed Steel* (HSS) (REBEYKA, 2016).

O aço de Taylor e White tinham em sua composição aproximadamente 0,67% de C, 18,91% de W, 5,47% de Cr, 0,11% de Mn e 0,29% de V. Estes elementos de liga associados a um tratamento térmico apropriado permitiram, na época, elevar as velocidades de corte da casa dos 3-5 m/min, comum para os aços ao carbono utilizados até então, para valores entre 30 – 35 m/min (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Hoje em dia existem diferentes combinações de elementos de ligas para os aços rápidos, todos são classificados pelo *American Iron and Steel Institute* (AISI) de acordo com a tabela abaixo (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Tabela 1 – Parte da tabela de classificação e composição dos aços rápidos segundo o AISI.

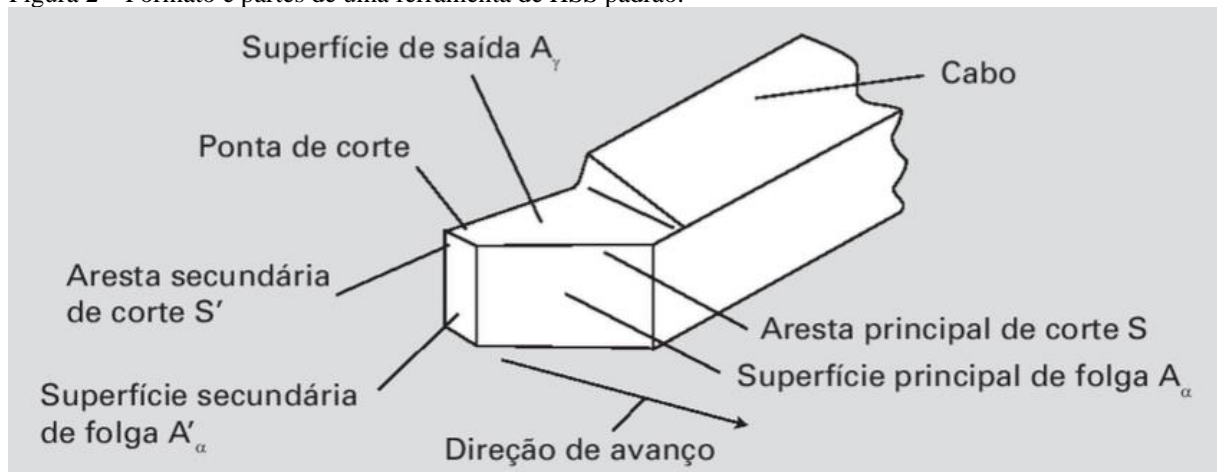
| Classificação de aços rápidos segundo o AISI | | | | | | | | | |
|--|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|---------------------|-------------|
| Classe | AISI | C | Mn | Si | Cr | V | W | Mo | Co |
| Classe 620 (tipos ao W) | | | | | | | | | |
| 620 | T1 | 0,70/0,75 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,10 | 1,00/1,20 | 18,00/18,25 | 0,70 (opc.) | - |
| 611 | T2 (tipo 1) | 0,80/0,85 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,25 | 2,00/2,15 | 18,00/18,50 | 0,50/0,75 (opc.) | - |
| 612 | T2 (tipo 2) | 0,95/0,98 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,25 | 2,00/2,15 | 18,00/18,50 | 0,50/0,75 (opc.) | - |
| 613 | - | 0,97/1,03 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 3,75/4,25 | 2,80/3,20 | 13,50/14,50 | 0,65/0,85 | - |
| 614 | - | 1,08/1,13 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,25 | 2,90/3,35 | 18,00/18,50 | 0,70/0,90 | - |
| 615 | T9 | 1,22/1,28 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 3,75/4,25 | 3,75/4,25 | 18,00/18,50 | 0,71 (opc.) | - |
| 616 | T7 | 0,70/0,75 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,50/5,00 | 1,50/1,80 | 13,50/14,50 | - | - |
| Classe 620 (tipos ao W – Co) | | | | | | | | | |
| 620 | T4 | 0,70/0,75 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,50 | 1,00/1,25 | 18,00/19,00 | 0,60/0,70 (opc.) | 4,75/5,25 |
| 621 | T5 | 0,77/0,85 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,50 | 1,85/2,00 | 18,50/19,00 | 0,65/1,00 (opc.) | 7,60/9,00 |
| 622 | T6 | 0,75/0,85 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,50 | 1,60/2,00 | 18,75/20,50 | 0,60/0,80 (opc.) | 11,50/12,25 |
| 623 | T15 | 1,50/1,60 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,50/4,75 | 4,75/5,00 | 12,50/13,50 | 0,50 (opc.) | 4,75/5,25 |
| 624 | T8 | 0,75/0,80 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 3,75/4,25 | 2,00/2,25 | 13,75/14,00 | 0,75 | 5,00/5,25 |
| Classe 630 (tipos ao Mo) | | | | | | | | | |
| 630 | M1 | 0,78/0,85 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 3,27/4,00 | 1,00/1,25 | 1,50/1,65 | 8,00/9,00 | - |
| 631 | M10 | 0,85/0,90 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 4,00/4,25 | 1,90/2,10 | - | 8,00/8,50 | - |
| 632 | M7 | 0,97/1,03 | 0,10/0,40 | 0,10/0,40 | 3,75/4,00 | 1,90/2,10 | 1,50/1,75 | 8,50/8,75 | - |

Fonte: adaptado de MACHADO; ABRÃO, *et al.* (2015)

Das ferramentas utilizadas, esta é a única que pode ser reaproveitada após algum tipo de avaria e/ou sofrer algum tipo de desgaste. Nesse caso basta afiar a ferramenta seguindo uma geometria específica.

A ponta de corte deve ter um formato que garanta uma melhor eficiência de corte, conciliando uma série de angulações definidas ao longo do tempo. (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015)

Figura 2 – Formato e partes de uma ferramenta de HSS padrão.



Fonte: MACHADO; ABRÃO, *et al.* (2015)

2.1.2 Metal Duro

A segunda grande revolução na questão dos materiais para ferramentas de corte aconteceu com o desenvolvimento do metal duro. Mais uma vez as velocidades de corte puderam ser elevadas em até dez vezes (de 35 mm/min para 250 mm/min até 300 mm/min). (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015)

Tal descoberta se deu na Alemanha por volta do início da década de 1920 por Schröter. Ele desenvolveu em seu laboratório o, hoje conhecido, carboneto de tungstênio a partir de um pó pela primeira vez, onde foi misturado com cobalto, também em pó (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Desta mistura surgiu no mercado, em 1928, a revolucionária classe dos metais duros, dos quais o carboneto de tungstênio faz parte e é amplamente utilizado ainda hoje. Tal classe recebeu o nome de *widia* que deriva da junção do termo em alemão *wie diamante*, cuja tradução seria algo como “como diamante”, referência clara a notável dureza e resistência ao desgaste que o material oferecia (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Hoje existem diferentes subclasses de ferramentas dentro da classe dos metais duros que são determinados pela norma ISO 513 de 2013 de acordo com a natureza do material a ser usinado por cada tipo de ferramenta (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Tabela 2 – Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513 (2004).

| Principais classes | | | Classes de aplicação | | |
|------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|---|---|
| Letra de identificação | Cor de identificação | Materiais a serem usados | Metais duros | a | b |
| P | Azul | Aços | P01 | ↑ | ↓ |
| | | | P10 | | |
| | | | P20 | | |
| | | | P30 | | |
| | | | P40 | | |
| | | | P50 | | |
| M | Amarelo | Aços inoxidáveis | M01 | ↑ | ↓ |
| | | | M10 | | |
| | | | M20 | | |
| | | | M30 | | |
| | | | M40 | | |
| | | | M05 | | |
| K | Vermelho | Ferro fundido | K01 | ↑ | ↓ |
| | | | K10 | | |
| | | | K20 | | |
| | | | K30 | | |
| | | | K40 | | |
| | | | K05 | | |
| N | Verde | Metais não ferrosos | N01 | ↑ | ↓ |
| | | | N10 | | |
| | | | N20 | | |
| | | | N30 | | |
| S | Marrom | Superligas e titânio | S01 | ↑ | ↓ |
| | | | S10 | | |
| | | | S20 | | |
| | | | S30 | | |
| | | | S05 | | |
| H | Cinza | Materiais duros | H01 | ↑ | ↓ |
| | | | H10 | | |
| | | | H20 | | |
| | | | H30 | | |

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013).

2.1.3 Nitreto Cúbico de Boro

O nitreto cúbico de boro (CBN) compõe um dos materiais de ferramentas classificados como ultraduros, como já nos indicou a figura 1. Tais materiais possuem como característica uma dureza extremamente elevada, acima dos 3.000 HV. São, juntamente com os diamantes naturais ou sintéticos, os materiais mais duros conhecidos na face da terra. (MACHADO, ABRÃO; *et al.*, 2015). Possui a vantagem da estabilidade química a alta temperatura, ao contrário do diamante, que pode voltar ao estado de grafite acima de temperaturas que rondam os 780°C em contato com oxigênio (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

Por ser um material com um processo de fabricação e desenvolvimento tão complexo, envolvendo processos sob elevadas temperaturas e pressões, este é um material com um custo de

aquisição mais elevado frente aos outros tipos de ferramentas de corte. Seu processo de fabricação envolve pressões da ordem dos 6 GPa a 8 GPa, além de temperaturas que circundam os 1800 K a 2000 K (VALPASSOS; RAMALHO, *et al.*, 2007).

2.2 Geometria das Ferramentas

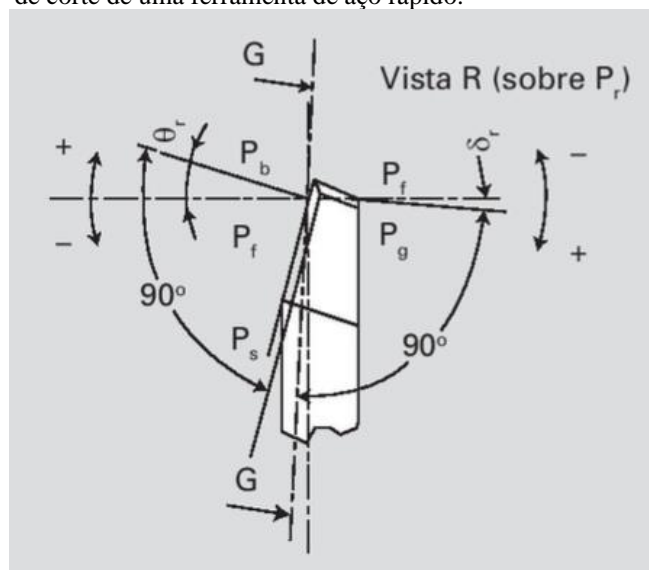
A geometria de corte da ferramenta influencia de maneira significativa no desempenho da usinagem. De nada adianta um material de excelente qualidade se a geometria da ferramenta não for a adequada para a operação. A influência é tão grande que hoje existe uma normalização dos ângulos da cunha cortante (MACHADO; ABRÃO, *et al.*, 2015).

A maioria das operações de usinagem são feitas com as chamadas ferramentas de geometria definida. Estas geometrias definidas são obtidas após detalhada análise por parte dos fabricantes de ferramentas para obter o máximo desempenho possível em diferentes condições de operação (REBEYKA, 2016).

Este desempenho é resultado de uma combinação de três fatores principais: o posicionamento correto da aresta de corte, aplicação de forças na direção e sentido corretos e velocidades de corte adequadas para a operação realizada (REBEYKA, 2016).

Quase todas ferramentas, com exceção da de aço rápido, já veem com sua geometria definida pelo próprio fabricante e não admitem afiação para reutilização após alguma avaria. Já a de aço rápido deve ser afiada antes da utilização seguindo algumas angulações.

Figura 3 – Esquema dos ângulos que influenciam nos parâmetros de corte de uma ferramenta de aço rápido.










Fonte: MACHADO; ABRÃO, *et al.* (2015)

Ferramentas de metais duros e ultraduros possuem diferentes geometrias que podem ser identificadas pela sua própria nomenclatura. Cada fabricante segue um padrão de nomenclatura diferente que pode ser consultado no seu próprio catálogo de ferramentas. Esta pode se apresentar de duas maneiras, seja por meio de pastilhas soldadas ao suporte ou também em forma de insertos intercambiáveis.

De acordo com o catálogo da Mitsubishi, que possui produtos voltados a área de ferramentas de corte, a sua nomenclatura segue um padrão de três partes alfanuméricas onde cada caractere representa algum aspecto da geometria da ferramenta.







O primeiro grupo de caracteres, composto por quatro letras significam, respectivamente, o formato geométrico do inserto, o ângulo de folga, a classe de tolerâncias dimensionais ao qual a ferramenta se enquadra e a forma de fixação e/ou presença ou ausência de quebra-cavaco. Tudo isso é mais detalhado nas tabelas 3, 4, 5 e 6 abaixo, todas podem ser encontradas no catálogo de insertos da Mitsubishi.

Tabela 3 – Formato do inserto de CBN segundo catálogo Mitsubishi.

| ③ Formato do Inserto | | |
|----------------------|--------------------|---|
| Símbolo | Formato do Inserto | |
| S | Quadrado |  |
| T | Triangular |  |
| C | Romboidal 80° |  |
| D | Romboidal 55° |  |
| V | Romboidal 35° |  |
| W | Trigon |  |
| R | Redondo |  |

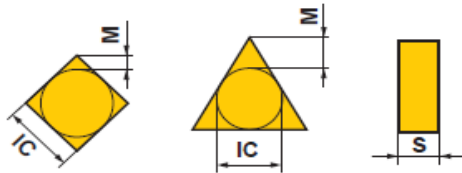
Fonte: MITSUBISHI (2019)

Tabela 4 – Ângulos de folga e seus respectivos caracteres na nomenclatura da ferramenta.

| ④ Ângulo de Folga | |
|-------------------|---|
| Símbolo | Ângulo de Folga |
| B | 5°  |
| C | 7°  |
| D | 15°  |
| E | 20°  |
| N | 0°  |
| P | 11°  |








Fonte: MITSUBISHI (2019)

Tabela 5 – Classes de tolerâncias das ferramentas de corte e suas respectivas letras representativas na nomenclatura da ferramenta de corte (G ou M).

|  | | | | | | |
|---|---|---|---------------------------------------|---------------|---------------|---------|
| Símbolo | Tolerância do Raio da Ponta M (mm) | Tolerância do Círculo Inscrito IC (mm) | Tolerância da Espessura S (mm) | | | |
| G | ±0.025 | ±0.025 | ±0.13 | | | |
| M* | ±0.08–±0.18 | ±0.05–±0.15 | ±0.13 | | | |
| A marcação * indica que a superfície do inserto é sinterizada. | | | | | | |
| Detalhe dos Insertos com Classe de Tolerância ● Tolerância do Raio da Ponta M (mm) | | | | | | |
| D.C.I. | Triangular | Quadrado | Romboidal 80° | Romboidal 55° | Romboidal 35° | Redondo |
| 6.35 | ±0.08 | ±0.08 | ±0.08 | ±0.11 | ±0.16 | — |
| 9.525 | ±0.08 | ±0.08 | ±0.08 | ±0.11 | ±0.16 | — |
| 12.70 | ±0.13 | ±0.13 | ±0.13 | ±0.15 | — | — |
| ● Tolerância do Círculo Inscrito IC (mm) | | | | | | |
| D.C.I. | Triangular | Quadrado | Romboidal 80° | Romboidal 55° | Romboidal 35° | Redondo |
| 6.35 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | — |
| 9.525 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 |
| 12.70 | ±0.08 | ±0.08 | ±0.08 | ±0.08 | — | ±0.08 |
| ⑤ Classe de Tolerância | | | | | | |

Fonte: MITSUBISHI (2019)

Tabela 6 – Tabela indicativa da nomenclatura de acordo com a forma de fixação e o quebra-cavaco da ferramenta.

| ⑥ Fixação e/ou Quebra-Cavaco | | | | |
|------------------------------|----------|--|----------------|---|
| Métrico | | | | |
| Símbolo | Furo | Configurações do Furo | Quebra-Cavacos | Figura |
| W | Com Furo | Furo Cilíndrico + Chanfro Unifacial (40–60°) | Face Plana |  |
| T | Com Furo | Furo Cilíndrico + Chanfro Unifacial (40–60°) | Unifacial |  |
| B | Com Furo | Furo Cilíndrico + Chanfro Unifacial (70–90°) | Face Plana |  |
| H | Com Furo | Furo Cilíndrico + Chanfro Unifacial (70–90°) | Unifacial |  |
| A | Com Furo | Furo Cilíndrico | Face Plana |  |
| M | Com Furo | Furo Cilíndrico | Unifacial |  |
| N | Sem Furo | – | Face Plana |  |
| X | – | – | – | Desenho Especial |

Fonte: MITSUBISHI (2019)

Tabela 7 – Tabela com as condições de corte de acordo com cada classe de ferramenta.

| Material | TIPO | Método de Usinagem | Classe Recomendada | Condições de Corte Recomendadas | | |
|---|---------------|---|--------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | | | Velocidade de corte (m/min) | Avanço (mm/rot) | Profundidade de Corte (mm) |
| Aço estrutural, especialmente aço cementado (SC, SCM, SCr) Aço Alta Liga (SKD, SKH) | Com cobertura | Acabamento em alta velocidade | NEW BC8105 | 250 (100–350) | –0.15 | –0.2 |
| | | | MBC010 | 250 (150–400) | –0.2 | –0.2 |
| | | Corte contínuo para uso geral | BC8110 | 200 (100–300) | –0.2 | –0.3 |
| | | | MBC020 | 200 (80–250) | –0.2 | –0.3 |
| | | Corte contínuo pesado para uso geral | NEW BC8120 | 200 (80–250) | –0.3 | –0.8 |
| | | | BC8020 | 150 (60–200) | –0.2 | –0.3 |
| | Sem cobertura | Corte interrompido para uso geral | NEW BC8130 | 120 (60–150) | –0.2 | –0.3 |
| | | | MB8025 | 180 (80–250) | –0.3 | –5 |
| | | Corte interrompido para uso geral | MB810 | 120 (60–150) | –0.2 | –0.3 |
| | | Acabamento em alta velocidade | MB825 | 200 (150–300) | –0.3 | –0.15 |
| | | Corte contínuo a levemente interrompido | MB835 | 120 (70–150) | –0.3 | –0.5 |
| Corte interrompido | MB835 | 100 (50–120) | –0.3 | –0.5 | | |

Fonte: MITSUBISHI (2019)

2.3 Desgastes e Avarias em Ferramentas de Corte

Antes de discorrer a respeito de desgastes de ferramentas de corte é importante ressaltar que existe uma diferença entre desgaste e avaria. Desgaste é a perda de partículas em escala microscópica na superfície da ferramenta que podem decorrer por diferentes motivos como, por exemplo, abrasão e a adesão de material a ferramenta por meio da soldagem por calor ou pressão. As demais ocorrências são chamadas de avarias, como exemplo podemos citar quebras e trincas (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2013).

Existem diversos tipos de desgaste em ferramentas. Este tipo de desgaste é natural, porém pode ser incentivado por alguns fatores como o aumento da temperatura de operação e parâmetros de usinagem incorretos como, por exemplo, a velocidade de corte. (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2013)

2.3.1 Desgaste Frontal ou de Flanco

É o tipo mais comum de desgaste, ocorrendo na superfície de folga da ferramenta, causada pelo contato direto entre a ferramenta e a peça. Este é o tipo de desgaste que está presente em todas as operações de usinagem, que em geral é incentivada pelo aumento da velocidade de corte. (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2013)

Figura 4 – Desgaste de flanco em uma ferramenta de corte do tipo inserto.



Fonte: SANDIVIK COROMANT (2019)

Este é o tipo preferível de desgaste, pois a partir dele é possível traçar de forma previsível e estável a vida útil da ferramenta. É um desgaste do tipo abrasivo (SANDIVIK COROMANT, 2019).

2.3.2 Desgaste de Entalhe

Ocorre nos dois extremos de contato entre ferramenta e peça alterando a geometria da ponta de ferramenta, o que causa uma queda de qualidade no acabamento superficial do material usinado (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

É causado por adesão, ou seja, a soldagem dos cavacos por pressão, além de ser incentivado por uma superfície endurecida (SANDIVIK COROMANT, 2019).

Figura 5 – Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte do tipo HSS.



Fonte: SANDIVIK COROMANT (2019)

2.3.3 Desgaste de Cratera

É causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco na superfície de saída da ferramenta. Ocorre por uma reação química entre o material da peça e a ferramenta podendo ser incentivada por uma velocidade de corte não ideal. A craterização enfraquece a aresta de corte e, quando se encontra com o desgaste frontal, pode resultar na quebra da ferramenta (SANDIVIK COROMANT, 2019) (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2013).

Figura 6 – Desgaste de cratera visto na superfície de ataque de uma ferramenta de corte.



Fonte: SANDIVIK COROMANT (2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico veremos em detalhes as ferramentas, materiais, maquinários e todos os métodos utilizados para a realização do estudo de caso apresentados em sequência de operação, a começar pela determinação do material a ser usinado e todos os ensaios realizados para aferição das suas reais propriedades e características. Estes ensaios têm como finalidade tomar conhecimento do material a fim de elevar a credibilidade dos resultados obtidos posteriormente e facilitar a sua análise e conclusão.

3.1 Determinação do Material a Ser Usinado

Buscou-se com o estudo uma resposta quanto ao custo-benefício das principais ferramentas de corte que se tem atualmente.

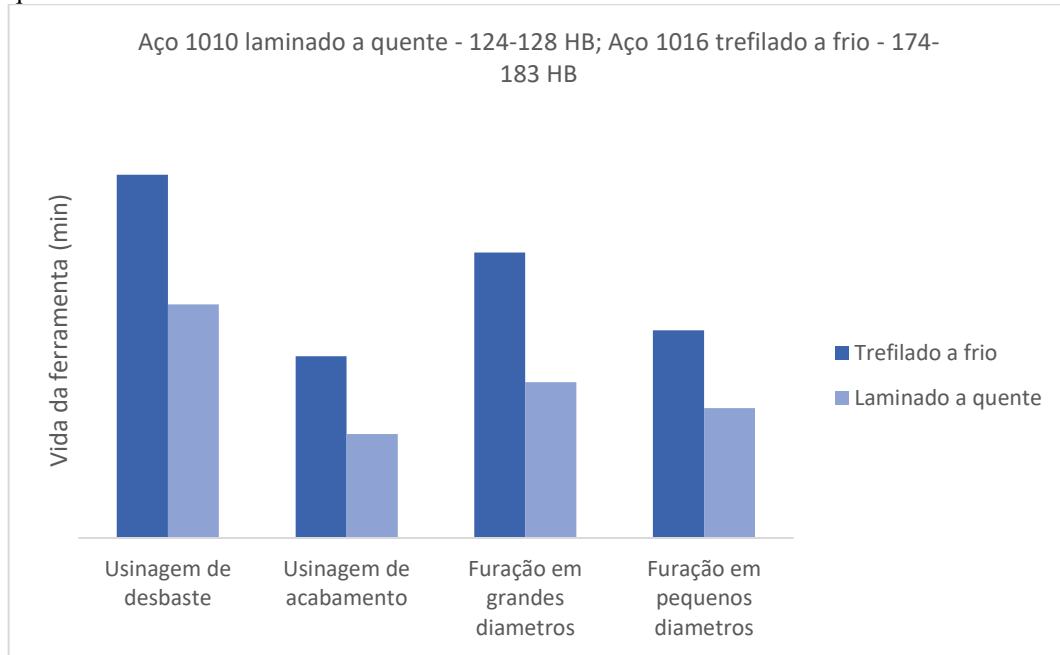
Como já dito anteriormente, cada ferramenta possui uma certa aplicabilidade de acordo com as características de seu material. Tendo isto em mente, optou-se por fazer um estudo com base em um aço de médio carbono por possuírem uma aplicabilidade mais ampla e características intermediárias que se situam dentro da extensão de materiais usinados por todas as ferramentas estudadas (SHACKELFORD, 2008).

Para se ter um resultado e uma resposta mais universal, ou seja, que possa ser fidedigno com os mais variados tipos de materiais usinados, optou-se pela utilização de um aço 1045. O motivo, como já esclarecido anteriormente, é o fato de este aço ser um aço de médio teor de carbono e, por isso, ter uma aplicabilidade ampla abrangendo desde aplicações com aços mais tenazes até aplicações com aços mais duros.

Para efeito de padronização do estudo, para a obtenção de resultados mais confiáveis, fez-se a utilização de corpos de prova retirados de uma única barra do metal. Esta mesma barra teve uma pequena amostra retirada para que se fosse realizado um ensaio de dureza a fim de determinar na a sua dureza em unidade Rockwell B.

Determinar o processo de fabricação por qual o material passou é de grande importância, uma vez que esse detalhe influencia diretamente na vida útil da ferramenta. Materiais trefilados a frio, por exemplo, geralmente fornecem uma vida útil maior a ferramenta de corte do que materiais laminados a quente por conta do maior nível de encruamento, que dificulta a formação de arestas postiças de corte (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2013).

Figura 7 – Efeito do encruamento na vida útil da ferramenta de corte em materiais com processo a frio e a quente.



Fonte: adaptado de DINIZ; MARCONDES e COPPINI (2013)

Desta forma foi acordado entre aluno e orientador, a utilização de corpos de provas que consistem em pequenos eixos de aço 1045 trefilado de 5/8” de diâmetro por 200 mm de comprimento. Foram usados ao todo três corpos de prova para cada ferramenta utilizada.

Figura 8 - Um dos corpos de prova usinados no experimento.



Fonte: o autor.

3.2 Ensaio de Dureza

Antes da usinagem do material, foi analisada a sua dureza em medidas Rockwell B em um durômetro WPM, um equipamento de fabricação alemã da década de 1970, que ainda hoje fornece resultados bastante precisos.

Figura 9 – Durômetro utilizado no ensaio de dureza da amostra do material usinado.



Fonte: o autor.

A amostra para o ensaio foi retirada do mesmo eixo de origem dos corpos de prova evitando, assim, qualquer variação nas propriedades do material causado pelo processo de beneficiamento do aço e metalurgia do eixo. Consiste em uma fração de 40 mm de comprimento pelo mesmo diâmetro de 5/8”.

A amostra teve sua superfície preparada antes do teste, sendo lixada por duas diferentes granulações de lixas, 220 e 320 até que pudesse ser polida em uma politriz, possibilitando assim ter um resultado mais confiável.

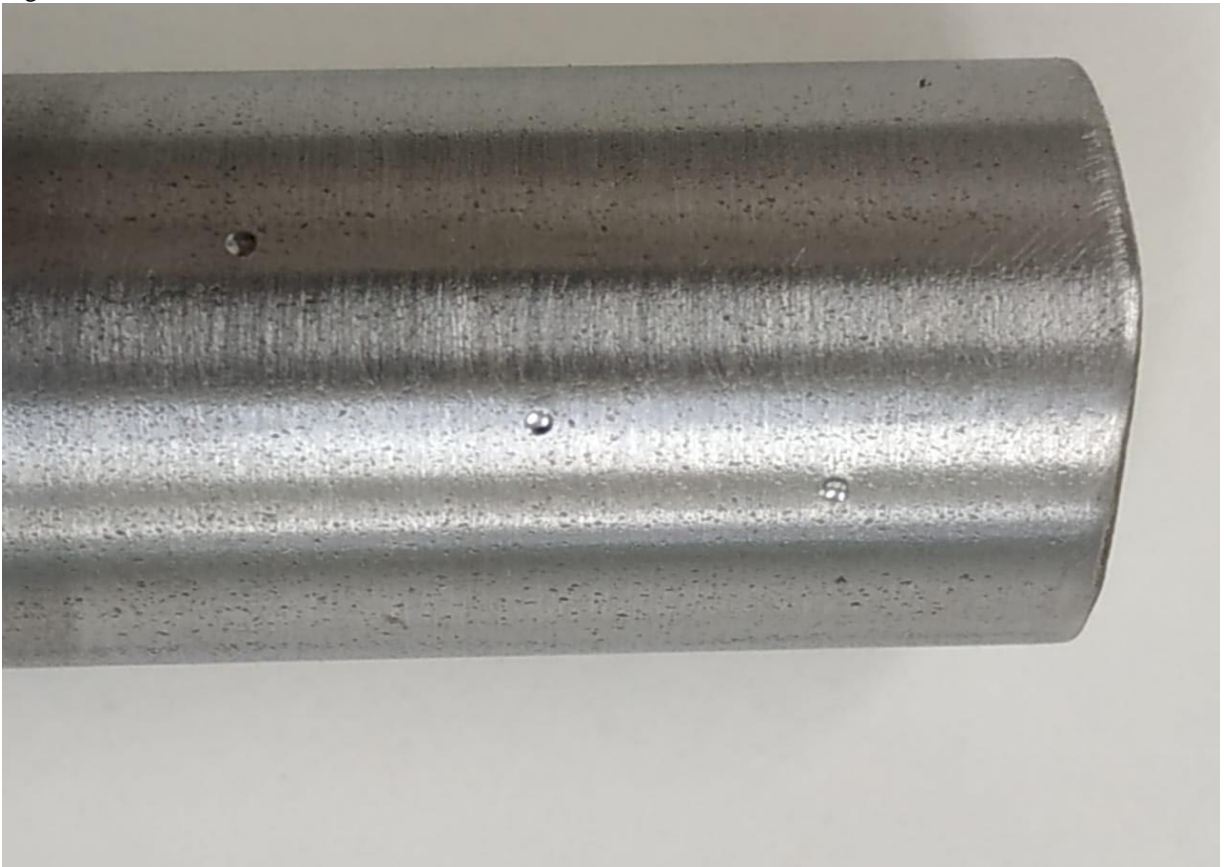
Figura 10 – Amostra retirada no material para análise de dureza.



Fonte: o autor.

Foram realizadas ao todo três ensaios com penetrador esférico metálico com carga de 100 kg. As medições revelaram valores de 103 HRB, 100 HRB e 103 HRB, respectivamente.

Figura 11 – Marcas dos ensaios de dureza realizados no material.



Fonte: o autor

3.3 Máquina-Ferramenta Utilizada no Estudo

Todos os procedimentos de usinagem foram realizados em uma única máquina-ferramenta. Um torno mecânico do modelo Nardini Mascote MS205.

Tal maquinário se encontra no laboratório de usinagem do Centro Universitário Sul de Minas. Existem ao todo quatro tornos deste mesmo modelo no laboratório numerados de 1 a 4. Os estudos foram realizados no torno de número 1. Este laboratório foi colocado à disposição pela própria instituição sob agendamento prévio para sua utilização e de todo o ferramental que o compõe.

Tabela 8 – Dados técnicos referente ao torno utilizado nos estudos.

| Dados Técnicos | |
|------------------------|----------|
| Potência | 7.1 kW |
| Número de velocidades | 18 |
| Velocidade mínima | 31,5 rpm |
| Velocidade máxima | 2500 rpm |
| Altura de pontas | 205 mm |
| Distância entre pontas | 1000 mm |

Fonte: o autor.

Figura 12 – Torno Nardini utilizado no estudo.



Fonte: o autor.

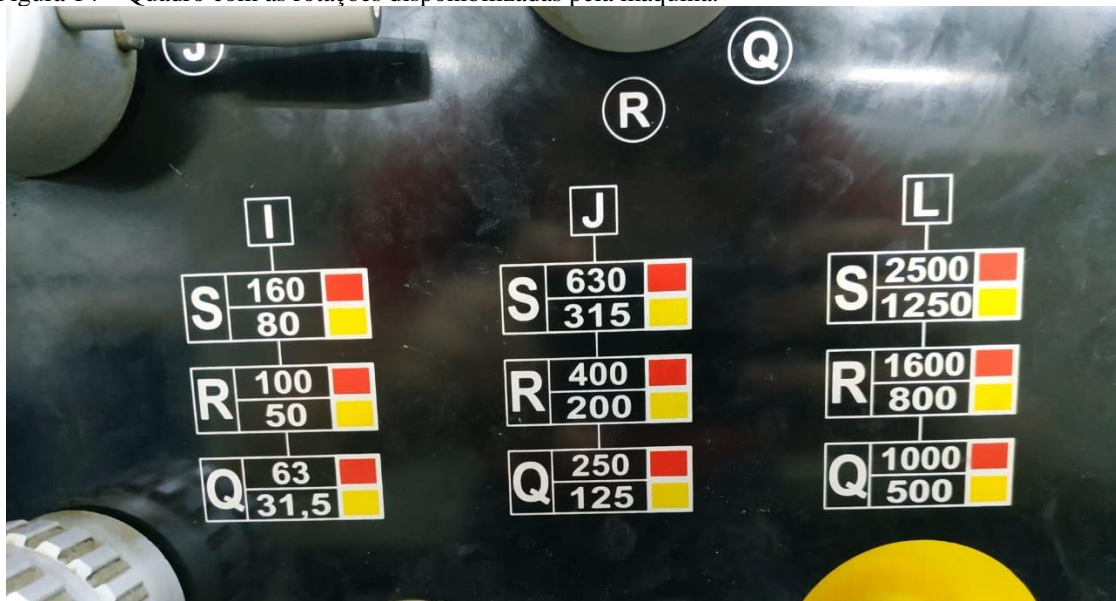
Mais detalhes a respeito da máquina são vistos nas imagens 7 e 8 a seguir, que mostram respectivamente a placa com os dados do motor e o quadro com todas as rotações disponíveis para utilização.

Figura 13 – Placa com os dados do motor elétrico que alimenta o torno utilizado.



Fonte: o autor.

Figura 14 – Quadro com as rotações disponibilizadas pela máquina.



Fonte: o autor.

3.4 Ferramentas Comparadas Durante o Estudo

Foram comparadas ao todo três ferramentas, cada uma representando uma classe de materiais de ferramentas.

3.4.1 Aço Rápido

Representando esta categoria de materiais foi utilizado um bits simples de aço rápido com dimensões de 3/8" da ADES. A geometria utilizada nessa ferramenta foi a geometria padrão para um bits, conforme ilustrado na figura 2 e 3.

Figura 15 – Exemplar real utilizado no estudo em seu respectivo suporte.



Fonte: o autor.

3.4.2 Metal Duro

Representando os materiais duros para ferramentas, foi utilizada um inserto de carboneto de tungstênio da ISCAR. O modelo de ferramenta utilizado foi um WNMG 080408-M3P IC8150. A sua geometria é definida por padrão pelo próprio fabricante, possuindo diferentes ferramentas com diferentes geometrias de acordo com a operação a ser realizada.

Figura 16 – Representação da ferramenta pelo *site* da ISCAR.



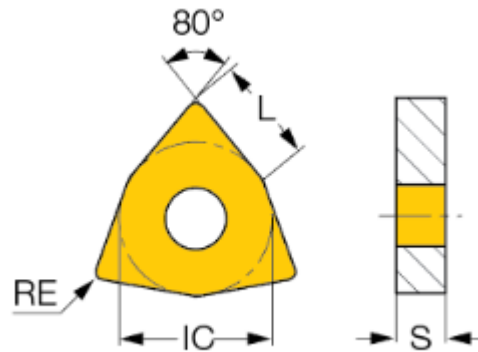
Fonte: ISCAR (2019)

Figura 17 – Exemplar real utilizado no estudo.



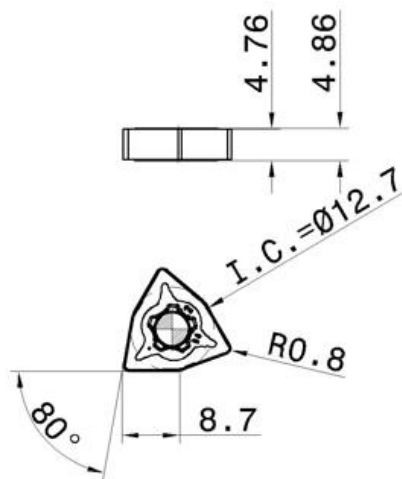
Fonte: o autor.

Figura 18 – Esquema de dimensões da ferramenta utilizada



Fonte: ISCAR (2019)

Figura 19 – Desenho com dimensões da ferramenta.



Fonte: ISCAR (2019)

3.4.3 Metal Ultraduro

A classe dos metais ultraduros foi representada por uma ferramenta Mitsubishi TNGA 160412 T3 MB8025.

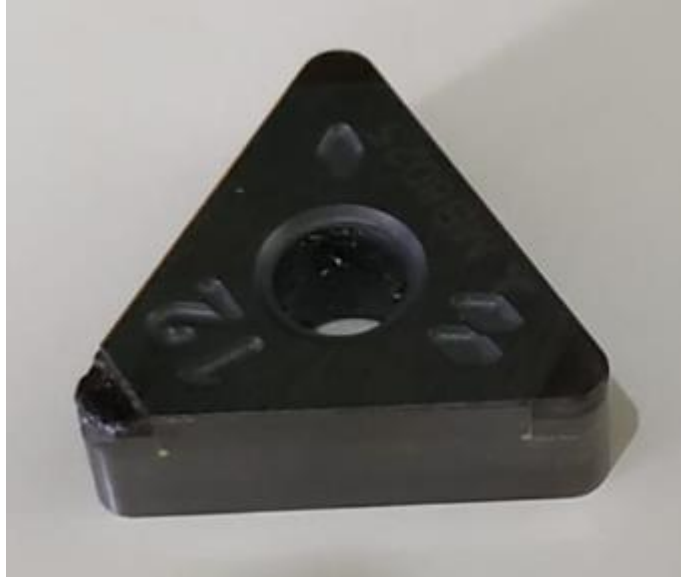
Segundo o catálogo de ferramentas Mitsubishi cada caractere traz uma informação a respeito da geometria e tipo de ferramenta. Neste caso específico temos que o T representa uma ferramenta de geometria triangular, o N informa que o ângulo de folga possui 0° , o G representa algumas tolerâncias dimensionais na geometria da ferramenta, podemos ver estas tolerâncias na tabela 5. Finalizando a primeira parte da nomenclatura a letra A indica a forma de fixação e o quebra-cavacos, neste caso é com furo e face plana.

Figura 20 – Representação da ferramenta utilizada pelo catálogo Mitsubishi



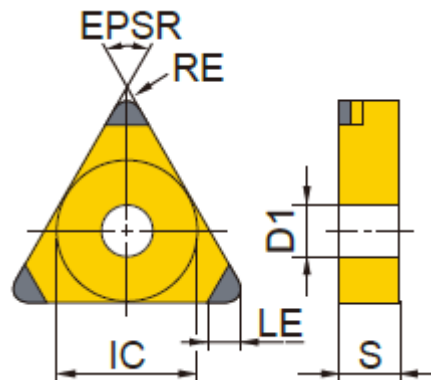
Fonte: MITSUBISHI (2019)

Figura 21 – Exemplar real da ferramenta utilizada no estudo



Fonte: o autor.

Figura 22 – Esquema de dimensões da ferramenta utilizada.



Fonte: MITSUBISHI (2019)

Tabela 9 - Características da ferramenta de CBN utilizada.

| FERRAMENTA MITSUBISHI TNGA 160412 T3 MB8025 | |
|--|----------------------|
| Formato do inserto | Triangular |
| Ângulo de folga | 0° |
| (M) | $\pm 0,025$ mm |
| Raio do círculo circunscrito (IC) | $9,525 \pm 0,025$ mm |
| Espessura (S) | $\pm 0,013$ mm |
| Fixação | Com furo |
| Quebra-cavaco | Face plana |
| Cobertura | Sem cobertura |
| Velocidade de corte (méd.) | 180 (80 – 250) m/min |
| Avanço (máx.) | 0,3 mm/rotação |
| Profundidade de corte (máx.) | 5 mm |

Fonte: adaptado de (MITSUBISHI, 2019)

3.5 Processo de Usinagem do Corpo de Prova

Os parâmetros de corte utilizados, como rotação e avanço foram determinados pelas suas respectivas fórmulas, considerando que as velocidades de corte definidas empiricamente, as quais podem ser vistas na tabela 9 a seguir.

Tabela 10 – Tabela de velocidade de corte para operações de torneamento.

| TABELA DE VELOCIDADE DE CORTE (V) PARA O TORNO | | | | | |
|---|---------------------------|------------|-------------------|-----------------------------------|------------|
| (EM METROS POR MINUTO) | | | | | |
| MATERIAIS | FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO | | | FERRAMENTAS DE CARBONETO-METÁLICO | |
| | DESBASTE | ACABAMENTO | ROSCAR RECARILHAR | DESBASTE | ACABAMENTO |
| AÇO 1020 | 25 | 30 | 10 | 200 | 300 |
| AÇO 1045 | 20 | 25 | 8 | 120 | 160 |
| AÇO EXTRADURO 1060 | 15 | 20 | 6 | 40 | 60 |
| FERRO FUNDIDO MALEÁVEL | 20 | 25 | 8 | 70 | 85 |
| FERRO FUNDIDO GRIS | 15 | 20 | 8 | 65 | 95 |
| FERRO FUNDIDO DURO | 10 | 15 | 6 | 30 | 50 |
| BRONZE | 30 | 40 | 10-25 | 300 | 380 |
| LATÃO E COBRE | 40 | 50 | 10-25 | 350 | 400 |
| ALUMÍNIO | 60 | 90 | 15-35 | 500 | 700 |
| FIBRA E EBNITE | 25 | 40 | 10-20 | 120 | 150 |

Fonte: SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (2018)

Com os valores da velocidade de corte em mão, foi possível determinar a rotação a ser utilizada no torno para cada ferramenta. É possível determiná-la a partir da equação a seguir:

$$vc = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

vc: velocidade de corte para o material a ser usinado e material da ferramenta;

D: diâmetro da peça a ser usinada;

n: rotação do eixo do torno.

Isolando-se o valor de “n”, temos que:

$$n = \frac{vc \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (2)$$

Aplicando os valores para a ferramenta de aço rápido:

$$n = \frac{20 \cdot 1000}{\pi \cdot 16} = \frac{20000}{16\pi} = 397,887 \text{ rpm}$$

A rotação que mais se aproxima disso dentre as opções apresentadas pelo modelo de torno utilizado é 400 rpm, portanto, foi a utilizada.

A partir desse valor foi feito um esquema de acréscimo de rotação para as ferramentas seguintes, sendo adotada uma rotação de 800 rpm para o carboneto de tungstênio, ou seja, dobrando a rotação utilizada na ferramenta de aço rápido.

As ferramentas de inserto de CBN possuem velocidades de corte diferentes para cada tipo, classe e/ou características da ferramenta, portanto o seu valor é dado pelo próprio catálogo do fabricante. Neste caso, temos que a velocidade de corte médio da ferramenta TNGA 160412 T3 MB8025 é de 180 mm/min.

Seguiu-se então o mesmo esquema de acréscimo utilizando de 1600 rpm com a ferramenta de CBN, mais uma vez dobrando a rotação utilizada na ferramenta de carboneto de tungstênio.

Por fim, foi calculada o avanço que seria utilizada em cada caso, tendo como base a tabela de avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça. Tal tabela pode ser usada tanto para o bits de aço rápido quanto para a ferramenta de carboneto de tungstênio.

Tabela 11 – Tabela de avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça.

| Avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça | | | |
|--|---|---|---|
| Diâmetro em mm | Avanço para desbaste em mm/rotação | Avanço para acabamento em mm/rotação | Avanço para sangrar, Torneamento interno em mm/rotação |
| 10 a 25 | 0,1 | 0,05 | 0,05 |
| 26 a 50 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| 51 a 75 | 0,25 | 0,15 | 0,1 |
| 76 a 100 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| 101 a 150 | 0,45 | 0,3 | 0,2 |
| 151 a 300 | 0,5 | 0,3 | 0,2 |
| 301 a 500 | 0,6 | 0,4 | 0,3 |

Fonte: SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (2018)

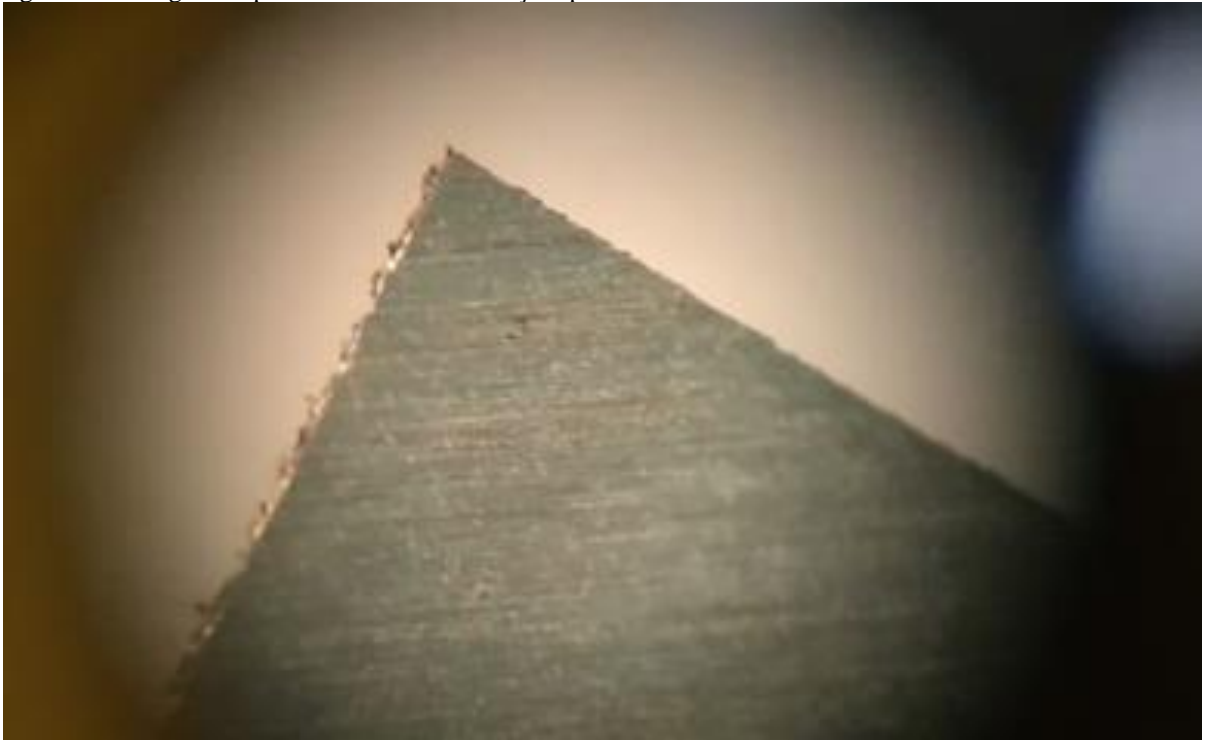
Assim como a velocidade de corte, o avanço para insertos de CBN é dado pelo próprio fabricante da ferramenta em seu catálogo, dispensando, desta forma, o cálculo. Como informado na tabela 7 e 9, o avanço recomendado para o modelo de inserto estudado é de 3 mm/rotação do eixo da máquina.

Vale lembrar que em nenhuma das operações foi utilizado qualquer tipo de emulsão e/ou fluido refrigerante, buscando-se preservar a fidelidade dos resultados, não havendo, portanto, influência de pequenos tratamentos térmicos na peça a ser usinada oriundos da refrigeração não-uniforme provocada pela utilização deste tipo de fluido.

3.6 Medição do Desgaste da Ferramenta

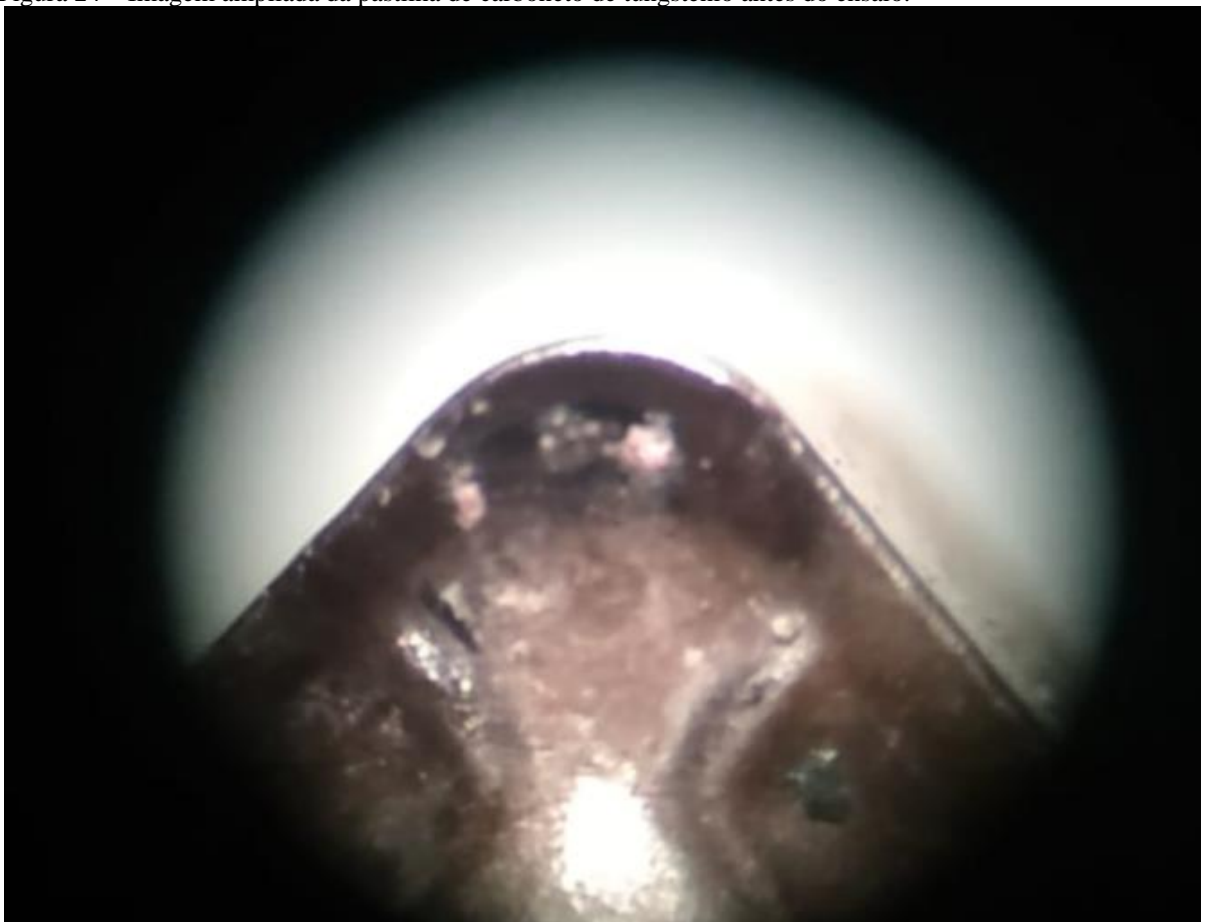
As medições foram realizadas mediante comparação de imagens ampliadas em microscópio antes e depois dos ensaios. As imagens antes dos ensaios podem ser vistas a seguir:

Figura 23 – Imagem da ponta da ferramenta de aço rápido antes dos testes realizados.



Fonte: o autor.

Figura 24 – Imagem ampliada da pastilha de carboneto de tungstênio antes do ensaio.



Fonte: o autor.

Figura 25 – Imagem da ponta da ferramenta de CBN antes dos ensaios.



Fonte: o autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Veremos agora todos os resultados dos testes e discorrendo a respeito, levando em conta desde o custo inicial de cada ferramenta até os resultados proporcionados por elas.

4.1 Orçamento Inicial do Ferramental

Para o estudo em questão a ferramenta de aço rápido foi fornecida pela própria instituição de ensino, tendo então custo de R\$0,00 sobre sua aquisição. Porém sabe-se através de consulta rápida a fornecedores de ferramentas que o custo médio de uma ferramenta desta natureza gira em torno dos R\$30,00 a R\$40,00.

A ferramenta de carboneto de tungstênio utilizada no estudo também teve custo R\$0,00, uma vez que foi obtida por terceiros que não cobraram pelo produto. No entanto, uma ferramenta deste modelo tem seu custo médio em torno dos R\$30,00.

Por fim, a única ferramenta que teve de ser adquirida para o estudo foi o inserto de CBN da Mitsubishi que teve ser custo orçado em R\$170,00 através da *internet*.

4.2 Desgaste das Ferramentas

A primeira ferramenta analisada foi o bits de aço rápido. Com os parâmetros definidos através das tabelas de cálculos foi usinado um total de 300 mm de comprimento com 1 mm de profundidade até que os primeiros sinais de desgastes pudessem ser observados. Foi nítido também que houve a queimadura da aresta de corte.

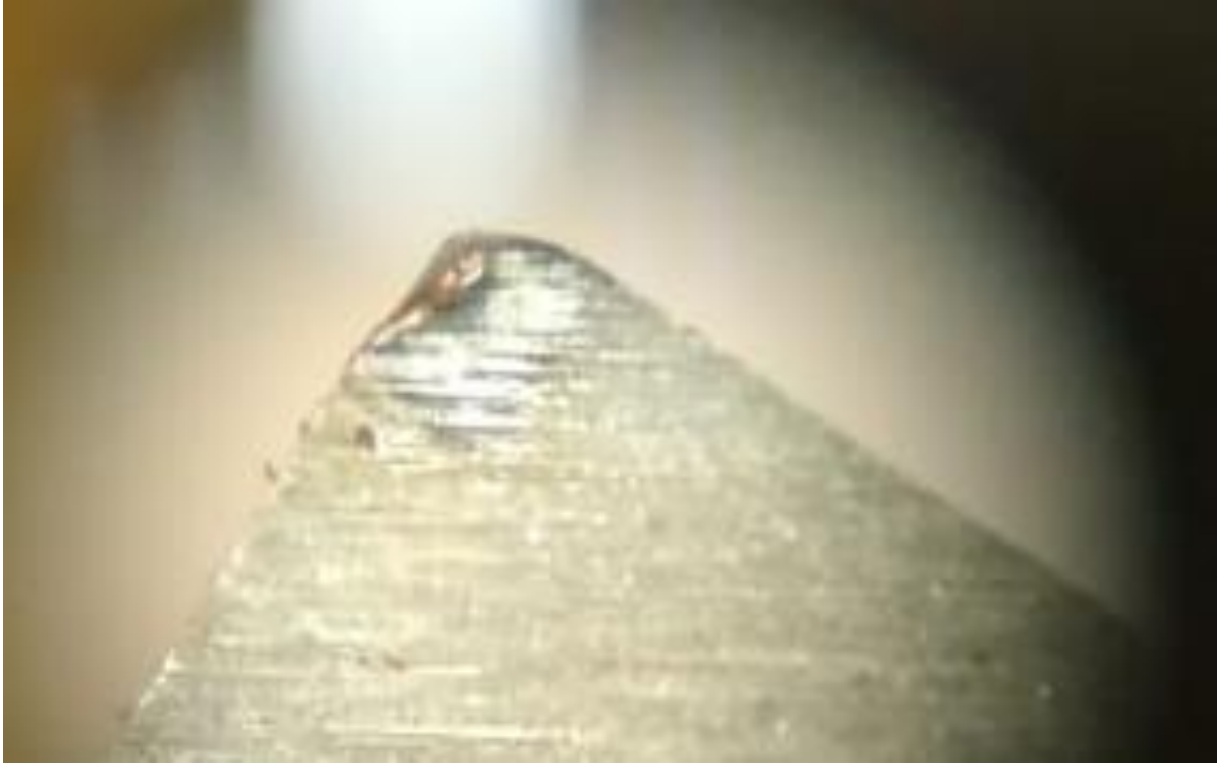
Figura 26 – Primeiros desgastes na aresta de corte do bits de aço rápido



Fonte: o autor.

Ao fim da usinagem de um corpo de prova até o diâmetro de 7 mm a ferramenta já havia desgastado demasiadamente a sua aresta de corte ao ponto de tornar impossível prosseguir a usinagem naquele estado, havendo a necessidade de afiar novamente. O estudo com o bits se encerrou aí, não sendo possível, então, completar a usinagem dos três corpos de prova.

Figura 27 – Ponta da ferramenta de aço rápido ao fim da usinagem do primeiro e único corpo de prova no qual foi utilizado.



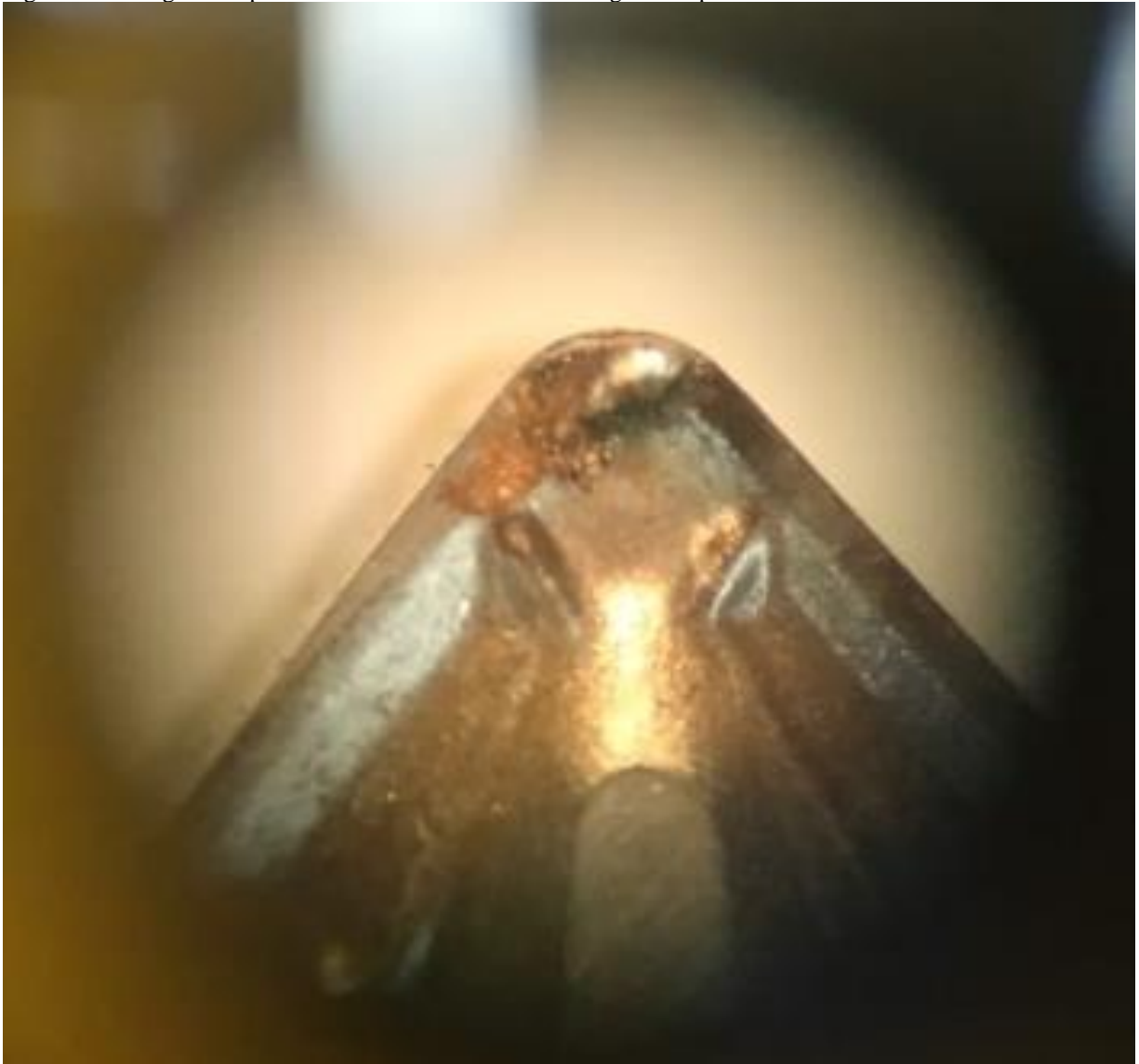
Fonte: o autor.

O estudo com o bits se encerrou prematuramente devido a impossibilidade de se prosseguir usinando com a ferramenta sem sua afiação devida as condições de acabamento superficial promovido por ela naquele estado.

A ferramenta de carboneto de tungstênio foi a segunda ferramenta estudada. Utilizando os parâmetros descritos no item 3.5 a ferramenta teve um comportamento considerado adequado sendo possível a usinagem dos três corpos de prova determinados previamente.

Ao fim da usinagem dos três corpos de prova pôde-se notar um leve desgaste em sua superfície de corte.

Figura 28 – Desgaste da ponta do inserto de carboneto de tungstênio após os estudos.



Fonte: o autor.

O inserto de CBN foi a terceira e última ferramenta estudada e, assim como o carboneto de tungstênio, apresentou um comportamento ótimo durante a usinagem. Todos os três corpos de prova puderam ser usinados sem maiores complicações durante a operação demonstrando considerável suavidade durante o corte do material.

Ao fim da usinagem dos três corpos de prova foi possível notar que quase não houve desgaste da ferramenta. Pôde-se notar algumas espécies de manchas que indicam que a ferramenta já foi utilizada, porém não é possível observar nenhum vestígio de grandes desgastes da aresta de corte.

Figura 29 – Ponta de corte após a usinagem dos três corpos de prova.



Fonte: o autor.

4.3 Tempo de Usinagem

Os tempos de usinagem das três ferramentas, ao contrário do previsto antes do estudo, não apresentou diferenças significativas. Quanto mais duro a ferramenta, mais rápido pôde ser realizada a operação, porém com pequenas diferenças de tempo que podem, de certa forma, serem desprezadas.

4.4 Acabamento Superficial

O acabamento superficial, por sua vez, apresentou diferenças gritantes entre as ferramentas estudadas.

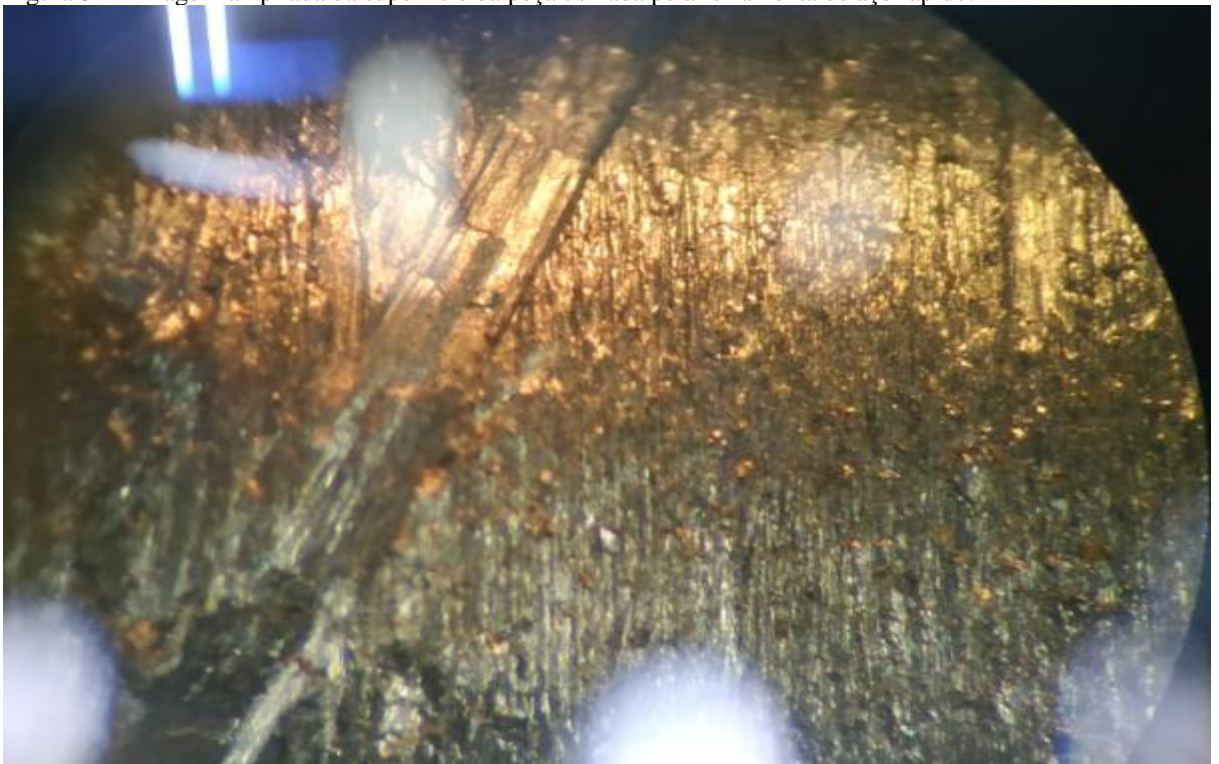
Como dito anteriormente, a ferramenta de aço rápido teve seu estudo encerrado prematuramente por apresentar incapacidade de seguir operando com o desgaste apresentado, muito por conta do acabamento superficial proporcionado pela ferramenta no estado em que ela se encontrava ao final da usinagem do primeiro corpo de prova.

Figura 30 – Superfície da peça usinada pela ferramenta de aço rápido ao fim do estudo.



Fonte: o autor.

Figura 31 – Imagem ampliada da superfície da peça usinada pela ferramenta de aço rápido.



Fonte: o autor.

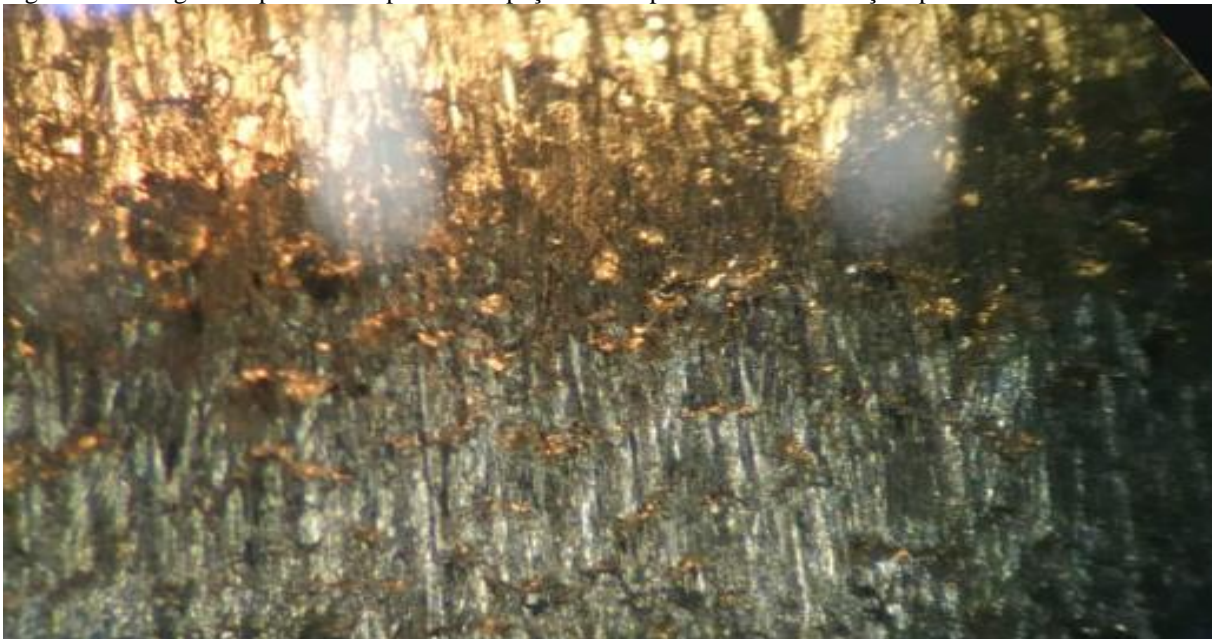
A ferramenta de carboneto de tungstênio apresentou um acabamento considerado ótimo no início do estudo, porém ao longo das operações e à medida que a ferramenta foi se desgastando houve uma queda de qualidade deste acabamento ao ponto de que ao fim do estudo a superfície do corpo de prova apresentou uma irregularidade levemente menor que a proporcionada pelo aço rápido.

Figura 32 – Superfície da peça usinada pela ferramenta de carboneto de tungstênio ao fim do estudo.



Fonte: o autor.

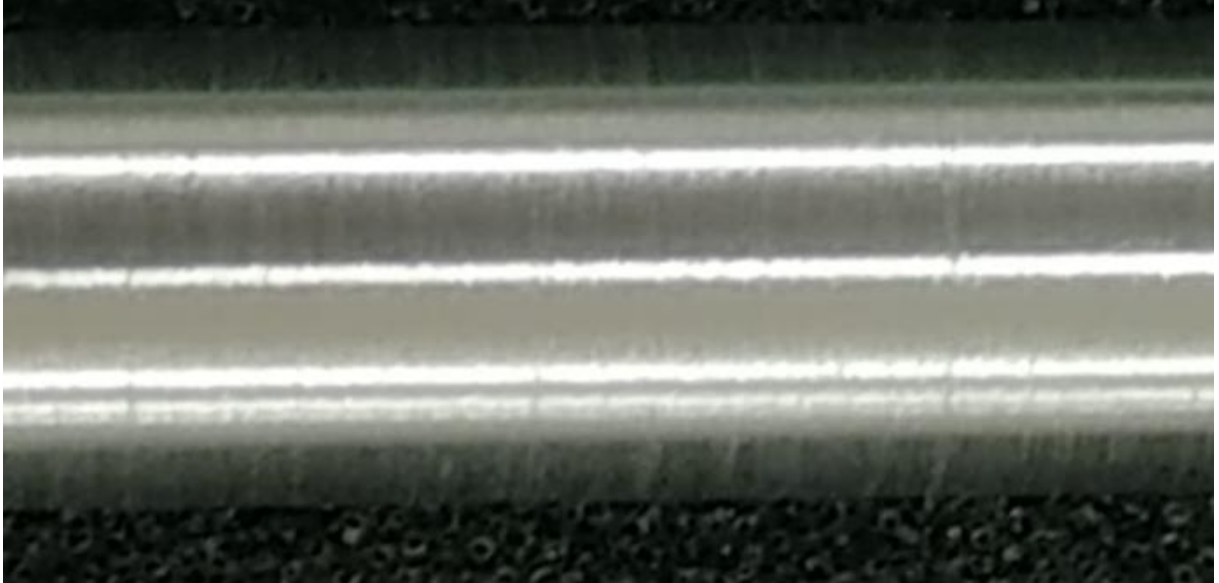
Figura 33 – Imagem ampliada da superfície da peça usinada pela ferramenta de aço rápido.



Fonte: o autor.

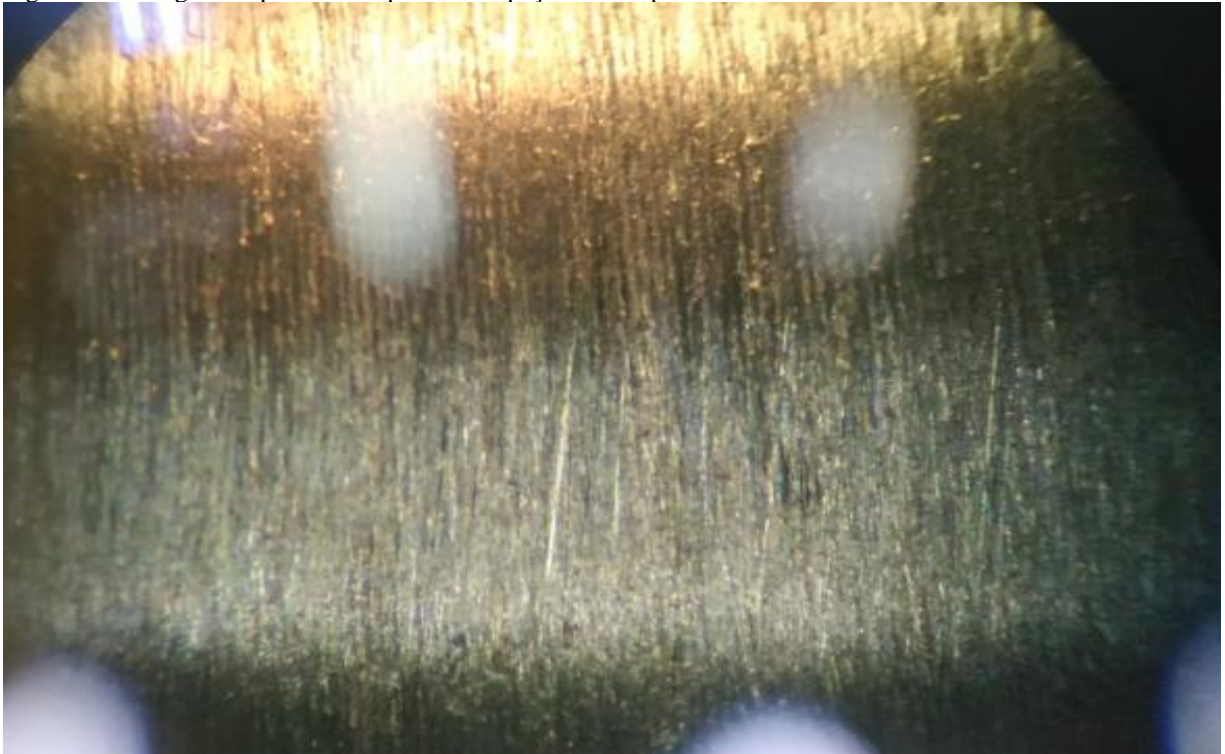
A diferença mais significativa ficou mesmo por conta da ferramenta de CBN. Seu acabamento foi considerado ótimo do início ao fim da operação. Parte disto se deve ao quase imperceptível desgaste da ferramenta. Ainda que seja possível notar alguns riscos oriundos da própria operação de usinagem, as irregularidades da superfície da peça usinada se aproximam da de uma peça lixada.

Figura 34 – Superfície da peça usinada pela ferramenta de carboneto de tungstênio ao fim do estudo.



Fonte: o autor.

Figura 35 – Imagem ampliada da superfície da peça usinada pela ferramenta de CBN ao fim do estudo.



Fonte: o autor.

5 CONCLUSÃO

Analisando os resultados, percebe-se, como imaginado, que não faz sentido classificar determinada ferramenta como superior ou inferior a outra pois cada uma delas apresentou pontos positivos e negativos frente as outras. O que se pode afirmar é que existem determinados serviços para os quais uma ferramenta se mostra mais adequada visto as diferenças de preço, resistência ao desgaste a acabamento superficial.

Um fato que ao final se mostrou contra o que se esperava no início, foi que a ferramenta de carboneto de tungstênio, apesar de ter resistido mais ao desgaste e ter proporcionado um acabamento consideravelmente bom ao início dos testes, apresentou ao fim um acabamento quase idêntico ao bits. Isto lhe torna, de uma forma geral, a ferramenta menos adequada para o aço 1045, uma vez que seu preço que se aproxima muito ao de um bits porem contendo no máximo apenas seis arestas de corte, ao passo que a ferramenta de aço rápido, quando desgastada, pode ser afiada novamente inúmeras vezes. O carboneto de tungstênio então é imediatamente eliminado no quesito custo-benefício.

Resta então as ferramentas de aço rápido e de CBN. Enquanto a primeira apresentou um desgaste muito rápido e um acabamento superficial insatisfatório, na segunda pôde-se observar uma quase ausência de desgaste e um acabamento superficial considerado de ótima qualidade. Isto a coloca em uma posição consideravelmente acima do bits, mesmo se levado em consideração o seu custo elevado de aquisição. A ausência de desgaste e o menor tempo de usinagem nas operações durante o estudo prova que, principalmente considerando um intervalo de tempo a longo prazo, este preço elevado mais que se justifica.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO 513: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas - Denominação dos grupos principais e grupos de aplicação**. São Paulo. 2013.
- BAPTISTA, A. L. D. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 2, Abril 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672002000200006&script=sci_arttext>. Acesso em: 12 Setembro 2019.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Bluscher, 1977.
- FRACARO, J. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. Curitiba: Intersaberes, 2017. Disponível em: <<https://bv4.digitalpages.com.br/?from=listas-de-leitura&page=4§ion=0#/legacy/128237>>. Acesso em: 31 Agosto 2019.
- ISCAR. **ISCAR Cutting Tools**, 2019. Disponível em: <<https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5567523&fnum=3543&mapp=IS&app=44&GFSTYP=M>>. Acesso em: 9 Novembro 2019.
- MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Bluscher, 2015. Disponível em: <<https://bv4.digitalpages.com.br/?from=listas-de-leitura#/legacy/171653>>. Acesso em: 31 Agosto 2019.
- MITSUBISHI. **Insertos de torneamento (CBN/PCD)**. [S.l.]: [s.n.], 2019. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/6815/1675/3481/catalog_c008z_cbn_pc_d_inserts.pdf>. Acesso em: 22 out. 2019.
- QUEIROZ, A. A. D. **Usinabilidade do ferro fundido cinzento e avaliação na temperatura e força de corte como sensores de desgaste**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1976.
- REBEYKA, C. J. **Princípios dos processos de fabricação por usinagem**. Curitiba: Intersaberes, 2016. Disponível em: <<https://bv4.digitalpages.com.br/?from=listas-de-leitura#/legacy/42171>>. Acesso em: 30 Agosto 2019.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Santo Ângelo, p. 19. 2010.

SANDIVIK COROMANT. Desgaste das arestas de corte. **Sandvik Coromant**, 2019. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx?Country=br>>. Acesso em: 12 setembro 2019.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Operações em máquinas convencionais**. Brasília: [s.n.], 2018.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Disponível em: <https://bv4.digitalpages.com.br/?from=listas-de-leitura&page=_4§ion=0#/legacy/424>. Acesso em: 9 Setembro 2019.

VALPASSOS, J. M. et al. Estudos preliminares da sinterização do nitreto cúbico de boro empregando ligantes à base de titânio. **Tecnologia em Metalúrgica e Materiais**, São Paulo, Outubro - Dezembro 2007. 12-16. Disponível em: <<http://tecnologiamm.com.br/files/v4n2/v4n2a03.pdf>>. Acesso em: 23 Setembro 2019.