

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS-UNIS/MG**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DOUGLAS SILVA BORGES**

**OTIMIZAÇÃO E GERENCIAMENTO DOS PARÂMETROS DE CORTE EM  
USINAGEM**

**Varginha/MG**  
**2019**

**DOUGLAS SILVA BORGES**

**OTIMIZAÇÃO E GERENCIAMENTO DOS PARÂMETROS DE CORTE EM  
USINAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS/MG, como requisito parcial para a Obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação da profa. Luciene de Oliveira Prósperi.

**Varginha/MG  
2019**

**DOUGLAS SILVA BORGES**

**OTIMIZAÇÃO E GERENCIAMENTO DOS PARÂMETROS DE CORTE EM  
USINAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS/MG, como requisito parcial para a Obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em:    /    /

---

Orientadora: profa. Luciene de Oliveira Prósperi.

---

(Banca Examinadora)

---

(Banca Examinadora)

OBS.:

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, com instrução e orientação, paciência, apoio e motivação.

Dedico este trabalho a todos que contribuíram,  
para a realização desta grande conquista em  
minha vida.

“Sabe o que é mais caro na Engenharia? O desconhecimento”.

(Luiz Anibal de Oliveira Santos)

## RESUMO

Este trabalho consiste nos estudos comparativos entre duas ferramentas de corte diferentes usadas em processos de usinagem com tornos, que são as pastilhas de metal duro e as de aço rápido, para determinar qual a opção possui maior viabilidade em termos de produção com menor custo, maior flexibilidade e qualidade no processo de usinagem. Tal abordagem se justifica de modo que ao se realizar o processo de usinagem com torno se opte pelo uso da ferramenta mais adequada segundo as necessidades exigidas. O objetivo deste trabalho é demonstrar através de um estudo de caso comparativo, qual das ferramentas gera uma maior flexibilidade e qualidade no processo usinagem, fazendo com que a peça tenha um melhor acabamento final, bem como qual das ferramentas fornece a possibilidade de produção com menor custo e a otimização. Este propósito será conseguido a partir da revisão bibliográfica e com a realização das operações de desbaste utilizando as duas pastilhas diferentes em um mesmo tipo de material, que será o aço carbono SAE 1020. As operações de usinagem serão realizadas no laboratório de usinagem da Universidade do Centro do Sul de Minas de maneira que simulem um processo de usinagem usado nas indústrias. A realização dos processos de usinagem com torno, com as duas ferramentas de corte, demonstra que resultados diferentes podem ser obtidos e que cabe ao operador escolher qual ferramenta de corte usar no torno segundo a necessidade que o produto final alcance.

**Palavras-Chaves:** Redução de tempo. Usinagem. Otimização.

## **ABSTRACT**

*This work consists of comparative studies between two different cutting tools used in lathe machining processes, which are carbide inserts and fast steel inserts, to determine which option has the highest production viability at the lowest cost, the highest flexibility and quality in the machining process. Such an approach is justified so that when performing the lathe machining process, one chooses to use the most suitable tool according to the required needs. The aim of this paper is to demonstrate through a comparative case study which tool generates greater flexibility and quality in the machining process, making the part have a better final finish, as well as which tool provides the possibility of production with less cost and optimization. This purpose will be achieved from the literature review and through the roughing operations using the two different inserts in the same type of material, which will be SAE 1020 carbon steel. The machining operations will be performed in the machining laboratory of the University of Center of the South of Minas so that they simulate a machining process used in the industries. Carrying out lathe machining processes with both cutting tools demonstrates that different results can be obtained and it is up to the operator to choose which cutting tool to use on the lathe according to the need the end product achieves.*

**Keywords:** *Time reduction. Machining. Optimization*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo tradicional.....	17
Figura 2 - Mecanismo flexível.....	18
Figura 3 - Flexibilidade distribuída (A) e flexibilidade concentrada (B).....	19
Figura 4 - Domínio fixo inicial - mecanismo genérico.....	22
Figura 5 - Influência do expoente $n$ no comportamento da função de energia de deformação modificada ( $p = 1$ ) .....	23
Figura 6 - Classificação das Pastilhas de Metal Duro.....	34
Figura 7 - Especificações do Aço Rápido.....	36
Figura 8 - Operação broca de centro.....	37
Figura 9 – Mandril.....	37
Figura 10 - Cabeçote móvel (Contraponto).....	38
Figura 11 - Processo de torneamento.....	38
Figura 12 - Torno mecânico horizontal.....	40
Figura 13 - Barras de aços trefelizados SAE 1020 ½’’.....	42
Figura 14 - Pastilha de metal duro.....	45
Figura 15 - Suporte e pastilha de metal duro.....	45
Figura 16 - Bits (Aço-Rápido) .....	45
Figura 17 - Suporte e aço rápido.....	45
Figura 18 - Corpos de prova - Aço SAE 120 ½’’.....	46
Figura 19 - Corpos de provas usinados.....	46
Figura 20 - Corpos de provas, comparativos de ferramentas.....	47
Figura 21 - Corpos de provas, comparativos de ferramentas.....	47
Figura 22 - Desbaste longitudinal – Aço Rápido.....	48
Figura 23 - Desbaste longitudinal – Aço Rápido.....	48
Figura 24 - Usinagem corpo de prova – Metal Duro.....	49
Figura 25 - Usinagem corpo de prova – Metal Duro.....	49
Figura 26 - Torno Convencional Horizontal.....	50
Figura 27 - Controle de Rotação.....	50

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Propriedades do Aço Carbono.....	41
Tabela 2 -Velocidade de corte no torno.....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Amostragem do processo.....	44
---	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1Objetivos.....</b>	<b>12</b>
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
<b>1.2 Problema.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Hipótese.....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Justificativa.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Operação de Usinagem.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Abordagens de otimização do processo de usinagem.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 A Metodologia de otimização para ambientes flexíveis.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Mecanismos com flexibilidade distribuída.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 Sistema de custeio.....</b>	<b>24</b>
2.5.1 Avaliando decisões operacionais: a abordagem da TOC.....	26
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Descrição da empresa.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Descrição do objeto de estudo.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 Planejamento do produto.....</b>	<b>32</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Atualmente, com o desenvolvimento da economia globalizada e com o avanço tecnológico, as indústrias são forçadas a serem cada vez mais competitivas. Seguindo essa lógica, a busca por redução dos custos de produção é uma constante nas empresas manufatureiras, uma vez que essa redução influencia no valor final das peças e, conseqüentemente, os produtos com custo final menor é mais aceito no mercado.

Esse trabalho consiste nos estudos comparativos entre duas ferramentas de cortes usadas no processo de usinagem mecânica em tornos convencionais, onde serão utilizadas duas ferramentas de desbaste como; pastilhas de aço rápido e pastilhas de metal duro. Com o objetivo de demonstrar qual ferramenta é mais adequada para as necessidades exigidas, gerando mais flexibilidade e qualidade no processo de usinagem. Demonstrando a melhoria com o auxílio da otimização, visando gerenciar a redução de tempo de produção, qualidade finais das peças durante o processo de usinagem.

O presente trabalho teve um estudo de caso, o mesmo foi realizado no laboratório de Engenharia do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS, situado na cidade de Varginha-MG no período de outubro de 2019.

### **1.1 Objetivos**

#### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é propor metodologia para otimização e gerenciamento do processo de usinagem, em cenário de fabricação flexível e custeio baseado em atividades, criando e definindo a velocidade de corte, como referência de otimização das condições operacionais introduzidas. E de fato demonstrar através de um estudo de caso comparativo, qual das ferramentas gera uma maior flexibilidade e qualidade no processo usinagem, fazendo com que a peça tenha um melhor acabamento final. Assim, pretende-se contribuir com os procedimentos existentes para a produção com menor custo, maior flexibilidade e qualidade no processo de usinagem.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar modelos de otimização em usinagem no contexto de fabricação flexível, caracterizado pelo empenho constante na redução de tempos e custos;
- Determinar uma referência para a velocidade de corte otimizada entre a e a velocidade de máxima produção apropriada ao cenário;
- Identificar o fim de vida da ferramenta sem o uso de equipamentos especiais de monitoramento e assim estabelecer o momento de troca da ferramenta, garantindo reprodutibilidade e confiabilidade;
- Realizar um estudo de caso, efetuando operações de usinagem em um determinado número de corpos de prova.

### 1.2 Problema

Quais são os problemas comuns na otimização do setup de máquinas e ferramentas de corte, visando redução de tempo, mão de obra e custos?

### 1.3 Hipótese

Visando a otimização no processo de usinagem, onde tem recebido diversos problemas nos últimos anos, em relação que os parâmetros envolvidos no processo de corte de metal estão relacionados com alguns outros parâmetros no processo de corte, onde o trabalho realizado terá um efeito influenciador em outro principalmente o fato de melhoria e redução de tempo, durante o processo de usinagem.

### 1.4 Justificativa

Os processos convencionais de corte de metais envolvem redução de metal por ferramentas de ponto único, múltiplo ou abrasivo. O presente trabalho se justifica de modo que ao realizar o processo de usinagem com torno se opte pelo uso da ferramenta mais adequada segundo as necessidades exigidas. O corte de metal convencional utilizado no processo de remoção de metal em uma peça de trabalho para obter uma forma desejada pelo movimento

relativo da peça de trabalho e da ferramenta utilizada. Visando diminuir o tempo de trabalho dos operadores e máquinas e com isso, a redução de custos.

O tema foi escolhido esta temática para estudos e considerações sobre possíveis melhorias dentro do processo produtivo. O aço é considerado como o material mais versátil, entre os materiais usináveis, devido ao seu total aproveitamento. Nesse sentido, o processo de usinagem é um dos processos de conformação mecânica mais utilizado nas indústrias manufatureiras, por isso este processo, realizado por máquinas e ferramenta, tem seu desenvolvimento contínuo, caracterizado pela busca por melhorias que auxiliem no aumento da qualidade e produtividade na usinagem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os tópicos a seguir abordarão os principais pontos relevantes da revisão bibliográfica pertinentes ao tema onde serão expostos: Operação de Usinagem Abordagens de otimização do processo de usinagem; A Metodologia de otimização para ambientes flexíveis; Mecanismos com flexibilidade distribuída; Sistema de custeio; avaliando decisões operacionais: a abordagem da TOC.

### 2.1 Operação de Usinagem

É entendido como operação de usinagem o conjunto de atividades que é constituída por ocasionar forma à peça, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma interação de qualquer destes três bens, produzem cavaco. Define-se cavaco como a porção de material retirada através de ferramenta da peça, distinguindo-se por ocasionar forma geométrica irregular (AHRENS, 2001, p. 2).

De acordo com Chiaverini (1986, p.193), os instrumentos metálicos fabricados por meio dos procedimentos metalúrgicos comuns, como fundição, forjamento, comumente exibem faces meio grosseiras e que, logo, necessitam de um certo acabamento. Contudo, os processos mencionados nem sempre conseguem obter certas características, como alguns tipos de saliências ou reentrâncias, furos rosqueados, furos passantes, etc. Através da usinagem tem-se a possibilidade de alcançar esses e diversos objetivos, aos quais, como resultado, podem ser resumidos assim:

- Acabamento da superfície dos artefatos fundidos ou conformados mecanicamente, de maneira a alcançar a mais perfeita aparência exterior e dimensões mais exatas, segundo as recomendações de produção e conforme o emprego;
- Aquisição de particularidades, difícil de alcançar através dos processos comuns;
- Produção seriada de peças, com um valor mais baixo;
- Confecção de uma ou raras peças, de forma qualquer, por meio de um bloco constituído por compostos metálicos.

De acordo com Silva e Zanin (2001, p. 18), CNC são as iniciais de *Computer Numeric Control*, ou em português Controle Numérico Computadorizado. No início dos anos de 1900 Herman Hollerith criou um sistema de armazenamento de dados para cartões perfurados para o setor de recenseamento dos EUA. Em 1912, Scheyer providenciou a patente da máquina de

cortar algodão aos EUA, que manteve o objetivo de "prover os meios para ou controlar movimento em qualquer direção ou espaço em um ou vários planos para movimentos angulares por meio de uma gravação preparada previamente em uma folha perfurada de papel ou outro material". A tecnologia emergiu por meio do ensaio de uma microempresa fabricante de hélices e rotores de helicópteros, "*Parsons Corporation*" que em 1946 havia experimentado colocar uma forma rudimentar de controle por números em uma máquina de usinagem convencional, ligando esta máquina a um computador que era alimentado por informações via cartões perfurados.

Segundo Chiaverini (1986, p.194), nos procedimentos de usinagem uma pequena quantidade do material das peças é removida por meio da utilização de uma ferramenta denominada ferramenta de corte criando o cavaco, que tem como característica o desenho geométrico irregular.

## **2.2 Abordagens de otimização do processo de usinagem**

Aqui serão discutidas as abordagens de otimização estudadas, dando destaque para aquelas utilizadas no desenvolvimento do sistema MOS.

A partir dos experimentos realizados por Taylor<sup>1</sup> em 1900, a otimização do processo de usinagem tem sido cada vez mais estudada, sempre objetivando a redução de custos ou aumento de produtividade.

A importância sobre o tema se reflete, sobretudo pela densidade de trabalhos publicados. Em 2004 Baptista realizou uma revisão bibliográfica sobre o assunto com o intuito de demonstrar o ineditismo de seu tema de Doutorado. Foram levantados praticamente seis dezenas de artigos publicados entre os anos de 1989 e 2004 em veículos de difusão do conhecimento internacionais.

Em 2004 Mukherjee elaborou um trabalho com o intuito de identificar as diferentes abordagens utilizadas em otimização de usinagem. Em todos os casos foi possível perceber a preocupação em se testar novas técnicas, desde simples tratamento matemático até a utilização de conceitos avançados de inteligência artificial, e de verificar sua aplicabilidade em ambiente controlado de laboratório. Também foi verificada a utilização dos dados e parâmetros obtidos

---

<sup>1</sup> TAYLOR, foi um Engenheiro Mecânico estadunidense. Técnico em mecânica e operário, formou-se engenheiro mecânico estudando à noite. Escreveu o livro "Os Princípios da Administração Científica", publicado em 1911. É considerado "o pai" da Administração Científica por propor a utilização de métodos científicos cartesianos na administração de empresas. Seu foco era a eficiência e eficácia operacional na administração industrial.

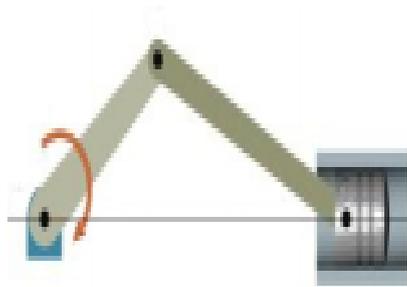
em catálogos. Nenhuma referência foi feita sobre a aplicação das abordagens encontradas em ambiente fabril ou sobre a utilização de dados obtidos especificamente para o sistema máquina-ferramenta-peça. Este fato, provavelmente se deve à ausência de interesse, dos práticos de usinagem, em divulgarem suas experiências no desenvolvimento de processos quando realizam testes das condições de corte planejadas em ambiente fabril.

Dentre todos os trabalhos pesquisados apenas um, qual seja o trabalho de Kuljanic e Cukor (2001), se refere ao emprego de uma versão expandida da equação de vida de Taylor, contudo, para a obtenção de todos os dados necessários para a definição da referida equação são necessários diversos testes, os quais foram realizados em laboratório.

### 2.3 A Metodologia de otimização para ambientes flexíveis

Um mecanismo é um dispositivo mecânico cuja função é transferir ou transformar movimento, força ou energia (BUSCH-VISHNIAC, 1998). Mecanismos tradicionais, tais como o ilustrado na Figura abaixo, são formados por diversas peças rígidas nas quais não são permitidas grandes deformações elásticas para que a eficácia do mecanismo não fique prejudicada. As articulações móveis entre as peças geram movimento relativo, ocasionando atrito e suas consequências, tais como ruído, desgaste, folga e vibrações.

Figura 1 - Mecanismo tradicional.



Fonte: (BUSCH-VISHNIAC, 1998).

Por sua vez, um mecanismo flexível (*compliant mechanism*), como o ilustrado na figura 1, permite que as funções deste dispositivo mecânico sejam cumpridas utilizando-se apenas uma peça, eliminando assim as juntas móveis, o desgaste e a necessidade de lubrificação.

A redução da quantidade de peças que o mecanismo flexível proporciona pode simplificar a produção eliminando a montagem e gerando assim uma grande redução nos custos de fabricação. Este tipo de mecanismo deve ter rigidez suficiente para transmitir esforços e em

contrapartida deve ter flexibilidade suficiente para se deformar e atingir o objetivo ao qual se propõe.

Dependendo da forma como a flexibilidade é distribuída ao longo do mecanismo, pode-se ter dois tipos de mecanismos flexíveis (Figura 2).

Nos mecanismos de flexibilidade concentrada, tem-se algumas regiões com flexibilidade muito maior do que no restante da peça. Por sua vez, nos mecanismos com flexibilidade distribuída, não se observa pontos com flexibilidade dominante.

Figura 2 - Mecanismo flexível.



Fonte: (BUSCH-VISHNIAC, 1998).

De modo geral, os mecanismos flexíveis proporcionam grande precisão nos movimentos, podendo ser fabricados em escala microscópica. Por isso são aplicados em sistemas que exigem tais requisitos, como sistema micro eletromecânicos (MEMS). Outra importante utilização dos mecanismos flexíveis é na instrumentação cirúrgica, onde a precisão é um fator determinante.

O peso reduzido, a possibilidade de construção em tamanhos muito reduzidos e aplicação em ambientes hostis fazem deste tipo de mecanismo uma grande alternativa para indústrias eletrônica e espacial. Assim como existem vantagens associadas a mecanismos flexíveis, existem também vários desafios e desvantagens para algumas aplicações.

Talvez o maior desafio seja analisar e projetar tais sistemas, pois isto requer conhecimento dos métodos de análise de mecanismos e da deflexão dos membros flexíveis do dispositivo. Devido a estas dificuldades, no passado os mecanismos flexíveis foram desenvolvidos pelo método de tentativa erro.

Tais métodos são aplicáveis apenas para sistemas muito simples e muitas vezes não são economicamente viáveis para muitas aplicações potenciais. Muitas teorias foram desenvolvidas

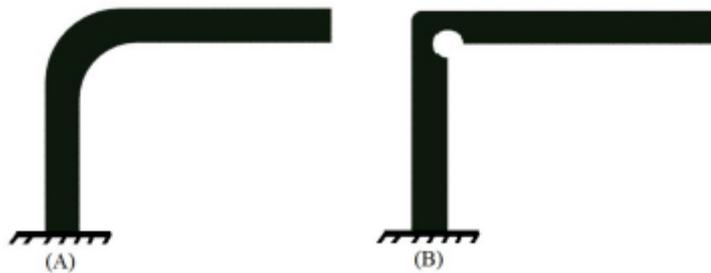
para simplificar a análise e o projeto de mecanismos flexíveis, mas mesmo considerando esses avanços, a tarefa de projetar e analisar tais sistemas ainda são desafiadores.

Os métodos para síntese de mecanismos flexíveis se dividem em dois tipos principais: a síntese cinemática e síntese do contínuo. A síntese cinemática (MIDHA; NORTON; HOWELL, 1992), é baseada na síntese de mecanismos tradicionais constituídos de elementos rígidos. Neste caso a flexibilidade fica concentrada apenas em algumas regiões do mecanismo, ocasionando tensões e deformações excessivas.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos baseados nessa teoria, onde a cinemática de corpos rígidos era aplicada para projetar um mecanismo parcialmente flexível ou com flexibilidade em algumas regiões somente (HER; MIDHA, 1987).

Outra abordagem que considera o projeto de mecanismos distribuídos concentrados é apresentada por Howell e Midha, (1996), sendo conhecida como pseudo-corpo rígido, possuindo barras rígidas e molas em sua constituição. Este método pode ser aplicado para desenvolver mecanismos com grandes deslocamentos.

Figura 3 - Flexibilidade distribuída (A) e flexibilidade concentrada (B).



Fonte: (HOWELL; MIDHA,1996)

Por outro lado, um mecanismo flexível projetado com base na síntese do contínuo, com uma formulação adequada e com o auxílio do Método da Otimização Topológica (MOT), pode ter a flexibilidade distribuída em toda sua estrutura.

Neste sentido, Ananthasuresh (1994) e Ananthasuresh e Kota (1995), foram os trabalhos pioneiros no uso do Método da Otimização Topológica para o projeto de mecanismos com flexibilidade distribuída.

Nestes trabalhos os autores propõem o uso de formulações de minimização de flexibilidade e peso, aplicando um carregamento pré-definido, com restrições nos deslocamentos do mecanismo, (SIGMUND, 1995; SIGMUND, 1999).

Estas formulações são muito parecidas com o projeto de estruturas rígidas, não satisfazendo os deslocamentos requeridos.

Por isso, este tipo de formulação não foi adotado em propostas consecutivas. O mecanismo flexível deve se deformar para atingir o deslocamento desejado e ao mesmo tempo deve ter rigidez para suportar os esforços envolvidos no movimento.

A partir desta ideia surgiram formulações baseadas em maximizar a energia mútua e minimizar a energia de deformação através de uma razão entre estas grandezas. Sobre este método cabe destacar os trabalhos de Frecker (1996), Kikuchi et al, (1998) e Nishiwaki et al (1998) e (LIN; LUO; TONG, 2010).

Existe ainda a proposta de Sigmund (1997), que maximiza um funcional baseado em parâmetros do mecanismo como vantagem mecânica (VA) e a vantagem geométrica (VG). A vantagem mecânica (VA) corresponde a razão entre o carregamento de saída e o carregamento de entrada ( $F_{out}/F_{in}$ ). A vantagem geométrica (VG) representa a razão entre o deslocamento de saída e o deslocamento de entrada ( $d_{out}/d_{in}$ ). O autor também propõe a maximização da eficiência mecânica (EM), definida como o produto de VA e VG.

Todas estas formulações propostas para projeto de mecanismos flexíveis apresentam a ocorrência de rótulas (*hinges*), que são elementos finitos conectados por apenas um nó (SIGMUND, 1997). Nestas regiões, ocorre um movimento de rotação de corpo rígido em torno da rótula, sendo que esta é uma maneira artificial de se obter o comportamento cinemático, uma vez que não há energia de deformação associada a este movimento (a elasticidade clássica não contempla o grau de liberdade de rotação).

Este é um dos principais problemas associados ao uso da Otimização Topológica no projeto de mecanismos flexíveis, sendo que diversas referências discutem alternativas para evitar o seu aparecimento.

Poulsen (2002), propõe uma função de restrição que associa o aparecimento de rótulas a um projeto inviável. Há também uma proposta baseada no método wavelet (YOON et al., 2004). Cardoso e Fonseca, (2004) propõem uma formulação de maximização de uma função da energia de deformação elástica para eliminar as rótulas dos mecanismos.

Esta mesma formulação é aplicada em Silva, (2007), para analisar múltiplos carregamentos. Ainda sobre este assunto Luo et al. (2008), apresentam um funcional baseado em energia e no método *level set*, que se mostra capaz de produzir mecanismos com flexibilidade distribuída. Formulações de filtros de erosão e dilatação como forma de eliminar a formação de rótulas são discutidos por (WANG; LAZAROV; SIGMUND, 2011).

Cardoso e Fonseca (2004), demonstram que os *hinges* estão associadas as abordagens de projeto de mecanismos propostas na literatura, pois o objetivo de maximizar o trabalho de saída do mecanismo é conflitante com o objetivo de se armazenar energia de deformação ao longo da topologia.

Desta forma, é proposta uma formulação onde o objetivo é maximizar uma função modificada da energia de deformação, de tal forma que a peça apresente flexibilidade distribuída.

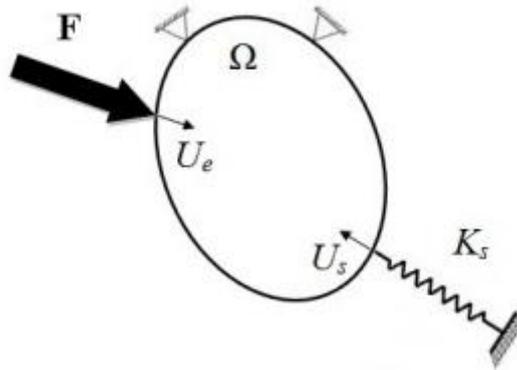
O comportamento cinemático é imposto via um conjunto de restrições. Entre outros trabalhos a respeito de mecanismos flexíveis, pode-se destacar o projeto de mecanismos multi atuadores piezelétricos aplicando o modelo SIMP (CARBONARI; SILVA; NISHIWAKI, 2005), e sua continuação, onde atuadores foram fabricados e analisados experimentalmente com interferômetro a laser (CARBONARI; NADER; SILVA, 2005).

Conforme Zhu e Zhang (2012), o método level set é utilizado para projetar mecanismos com flexibilidade distribuída. Por fim, Mello, Salas e Silva (2012), propõem a maximização do deslocamento de saída (definido como uma função do tempo) de mecanismos eletro termomecânicos MEMS com o objetivo de reduzir o tempo de resposta da estrutura.

## **2.4 Mecanismos com flexibilidade distribuída**

Em se tratando da Otimização Topológica, o projeto de mecanismos flexíveis iniciasse com a definição de um domínio fixo,  $\Omega$ , onde estará contida a estrutura final (Figura 4). Então deve-se definir as condições de contorno do problema bem como a rigidez do meio externo  $Ks$  que representa o corpo submetido a ação do mecanismo e um conjunto de deslocamentos de entrada,  $Ue$ , e de saída,  $Us$ , associados ao comportamento cinemático.

Figura 4 - Domínio fixo inicial - mecanismo genérico.



Fonte: (CARDOSO; FONSECA, 2004)

Uma formulação adequada para o projeto de mecanismos com flexibilidade distribuída deve impor que uma parte da energia disponível seja armazenada na estrutura sob a forma de energia de deformação elástica. Além disso, ela deve ser facilmente aplicada a problemas com não linearidade geométrica e/ou material e deve considerar características do meio externo (CARDOSO; FONSECA, 2004). Baseados nessa análise Cardoso e Fonseca (2004), mostram que a energia de deformação efetiva de um elemento,  $E_{def}$ , é inversamente proporcional a sua pseudo densidade

$$\bar{E}_{def_e} = \frac{1}{\rho_e^p} E_{def}^0$$

Onde  $\rho_e$  é a pseudo densidade do elemento e  $E_{def}^0$  é a energia de deformação considerando o material isotrópico base ( $E^0_{ijkl}$ ) e  $p$  é o expoente da penalização SIMP.

Cabe salientar que no trabalho de Cardoso e Fonseca a formulação é particularizada para  $p = 1$ , sendo que aqui as equações serão desenvolvidas de forma geral. Evidentemente, a maximização de  $E_{def}$  é obtida quando  $\rho_e \rightarrow 0$ , fazendo com que não seja possível obter uma topologia sólida.

Para lidar com este problema, é proposta pelos autores uma função baseada na energia de deformação de um elemento finito

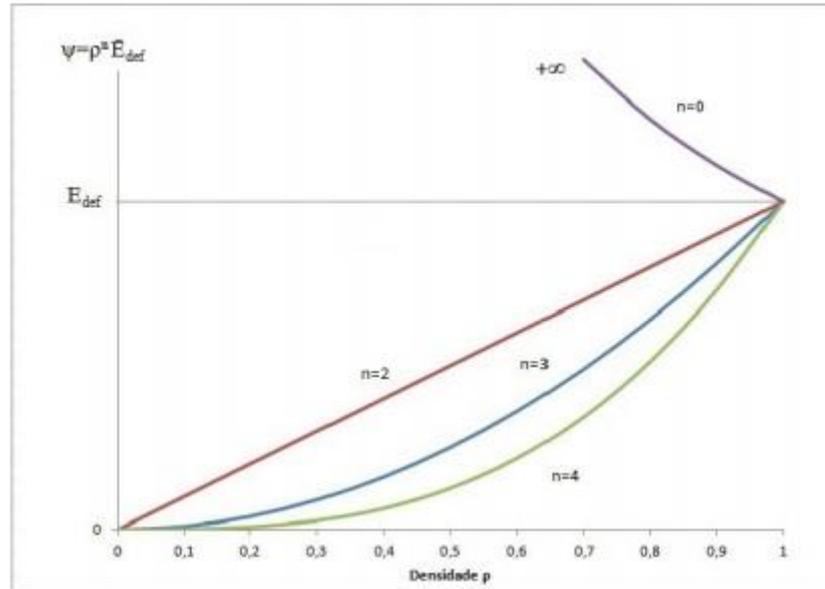
$$\Psi_e = \rho_e^n \bar{E}_{def} = \rho_e^{n+p} \mathbf{U}_e^T \mathbf{K}_e^0 \mathbf{U}_e = \rho_e^n \mathbf{U}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{U}_e,$$

Onde  $\rho_e$  é a pseudo densidade do elemento,  $\mathbf{U}_e$  é o vetor deslocamento do elemento,  $n$  é um expoente que permite ajustar o comportamento da função  $\Psi_e$  e  $\mathbf{K}_e$  e  $\mathbf{K}_e^0$  são a matriz de rigidez do elemento, com e sem a pseudo densidade, respectivamente.

Esta nova função evita o valor de energia infinita quando  $\rho \rightarrow 0$ , penaliza o aparecimento de pseudo densidades intermediárias e retém o comportamento da energia de deformação original para o material sólido ( $\rho = 1$ ).

A figura 5 ilustra este comportamento para alguns valores de  $n$  (assumindo  $p = 1$ ).

Figura 5 - Influência do expoente  $n$  no comportamento da função de energia de deformação modificada ( $p = 1$ ).



Fonte: (CARDOSO; FONSECA, 2004)

Para toda a topologia, composta de  $ne$  elementos finitos, definimos:

$$\Psi = \sum_{e=1}^{ne} \rho_e^n \mathbf{U}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{U}_e = \sum_{e=1}^{ne} \rho_e^{n+p} \mathbf{U}_e^T \mathbf{K}_e^0 \mathbf{U}_e$$

De tal forma que a maximização desta função implica em maximizar o armazenamento de energia no material (sólido) que constitui o mecanismo flexível. O comportamento cinemático deve ser imposto por meio de um conjunto de restrições sobre deslocamentos em graus de liberdade de interesse e a quantidade de material a ser utilizada deve ser imposta por meio de uma restrição de volume. Assim, obtém-se a formulação de otimização

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}} \quad & \Psi \\ \text{T.q.} \quad & \int_{\Omega} \rho d\Omega \leq V_{max} \\ & \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \\ & U_j \leq \bar{U}_j \quad j = 1..n_{rd} \end{aligned}$$

Onde  $U_j$  representa a  $j$ -ésima componente do vetor de deslocamento global,  $U_j$  é o seu valor limite,  $nrd$  é o número de restrições de deslocamento e  $Vmax$  é o volume máximo de material.

Um fator importante na obtenção de um mecanismo flexível é o balanço de energia. Nas formulações que maximizam, direta ou indiretamente, o trabalho de saída, é de se esperar que não haja energia para ser armazenada no interior do mecanismo.

Com isto, o otimizador irá utilizar artifícios como os elementos conectados por um nó (rótulas). Na formulação da equação acima, deve-se avaliar se o comportamento cinemático imposto permite o armazenamento de energia suficiente para o projeto de um mecanismo flexível. Como exemplo, considere um mecanismo com uma força de entrada  $Fe$ , uma restrição de deslocamento de entrada  $Ue$ , uma rigidez de saída  $Ks$  e uma restrição de deslocamento de saída  $Us$ .

A energia disponível no interior da região de projeto será

$$E_{max} = E_e - E_s = \frac{1}{2} (F_e U_e - K_s U_s^2)$$

Sendo que combinações de parâmetros que levem a  $E_s > E_e$  não permitem o projeto de mecanismos flexíveis. Uma questão importante no projeto de mecanismos flexíveis é o controle do nível de tensões mecânicas.

Uma questão não abordada no artigo de Cardoso e Fonseca (2004), é o fato de as tensões serem diretamente proporcionais a energia de deformação, de tal forma que a maximização de energia deve levar a uma maximização das tensões. Por isto, o presente trabalho tem como objetivo principal a imposição de restrições de tensão na formulação da equação acima.

## 2.5 Sistema de custeio

Ferraresi (1977), Coelho (1999), e Diniz et al. (2001) concordam que três parcelas são identificadas no cálculo do custo de usinagem por peça, sendo elas, os custos relativos à mão-de-obra,  $K_{us}$ , à máquina-ferramenta,  $K_{um}$ , e à ferramenta,  $K_{uf}$ . O custo de produção por peça pode ser calculado por meio da Equação (1). Os demais desdobramentos para o cálculo do custo de usinagem por peça são detalhados a seguir, de acordo com as equações propostas pelos autores citados acima.

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf}$$

Onde:  $K_p$  = custo de produção por peça [R\$ / Peça];  $K_{us}$  = custo de mão-de-obra envolvida na usinagem [R\$ / peça];  $K_{um}$  = custo da máquina-ferramenta [R\$ / Peça];  $K_{uf}$  = custo da (s) ferramenta (s) [R\$ / Peça].

O custo de mão-de-obra pode ser calculado por meio da Equação (2).

$$K_{us} = t_t \cdot S_h / 60$$

Onde:  $t_t$  = tempo total de confecção por peça [min];

$S_h$  = salário do operador mais encargos [R\$ / hora].

Para o cálculo do custo da máquina-ferramenta utiliza-se o salário máquina, que é obtido por meio da Equação.

$$S_m = 1/H[(V_{mi} - V_{mi} \cdot i_m / M) \cdot J + V_{mi} / M + K_m + (E_m \cdot K_e \cdot J)]$$

Onde:  $S_m$  = salário máquina [R\$ / hora];

$H$  = número de horas de trabalho previstas por ano

$V_{mi}$  = valor inicial de aquisição da máquina-ferramenta [R\$];

$i_m$  = idade da máquina ferramenta [anos];

$M$  = vida prevista para a máquina-ferramenta [anos];

$j$  = taxa anual de juros;

$E_m$  = espaço ocupado pela máquina-ferramenta [ $m^2$ ];

$K_m$  = custo de manutenção [R\$ / ano];

$K_e$  = custo do  $m^2$  ocupado pela máquina-ferramenta [R\$ /  $m^2 \cdot$  ano];

Assim, o valor do custo da máquina-ferramenta é calculado por meio da Equação (4).

$$K_{um} = (t_t / 60) \cdot S_m$$

Considerando a utilização de pastilhas intercambiáveis como ferramenta de corte, o custo de cada aresta da ferramenta pode ser calculado por meio da Equação (5).

$$K_{ft} = (V_{si} / N_{fp}) + (K_{pi} / N_s)$$

Onde:  $K_{ft}$  = custo de cada aresta de corte do inserto [R\$];

$V_{si}$  = custo de aquisição do porta ferramenta [R\$];

$N_{fp}$  = vida média para o porta ferramentas em número de trocas;

$K_{pi}$  = custo de aquisição do inserto [R\$];

$N_s$  = número de arestas de corte disponíveis em cada inserto.

Assim, o custo da ferramenta por peça pode ser calculado por meio da Equação (6).

$$K_{uf} = K_{ft} / Z_t$$

Onde:  $Z_t$  = número de peças usinadas por vida da ferramenta.

Para os processos de furação e fresamento, existem algumas especificidades que necessitam ser observadas:

No caso de fresamento ou furação, em que mais de uma aresta é utilizada (ferramentas multicortantes), é necessário multiplicar o custo da aresta pelo número de arestas existentes no suporte.

Para as ferramentas de material inteiriço que permitem afiações (brocas e fresas), deve-se dividir o custo total da ferramenta pelo número de afiações previstas, tendo-se, assim, o custo de cada aresta. Embora a necessidade de afiação esteja reduzida a casos particulares, há situações específicas que exigem tal prática. Ao custo total de cada aresta deve ser adicionado o custo de uma afiação.

O custo de usinagem, Kum, pode ser utilizado para diversas finalidades, como a definição da viabilidade de produção de um determinado item e/ou o preço de venda de um produto, por exemplo.

Contudo, existem situações em que, mesmo se conhecendo o seu valor, persistem algumas limitações, tais como a definição do preço de venda, em tomadas de decisões operacionais de processos de usinagem. Surge então a possibilidade do emprego de alguns conceitos da TOC para a definição de uma nova referência para a otimização de processos de usinagem.

### 2.5.1 Avaliando decisões operacionais: a abordagem da TOC

Um dos maiores desafios em termos de tomadas de decisões operacionais é resolver os aparentes conflitos que surgem quando as atividades gerenciais do dia-a-dia exigem que se leve em conta, simultaneamente, o ótimo desempenho operacional local e o objetivo do sistema organizacional como um todo.

A Teoria das Restrições talvez seja uma das filosofias gerenciais que mais atenção vem dando a esta questão. A abordagem TOC reconhece, inicialmente, que toda organização deve ser encarada como um sistema, isto é, um conjunto de elementos entre os quais há alguma relação de interdependência (CORBETT, 2005).

O próximo passo enfatiza a noção amplamente aceita que todo sistema possui um propósito ou meta e, desta forma, toda ação tomada por qualquer parte do sistema (empresa) deve ser julgada pelo seu impacto na meta global. Para isso, torna-se imperativo que sejam definidas medidas que permitam que se julgue o impacto de qualquer subsistema e de qualquer ação local neste subsistema (GOLDRATT, 1990).

Se toda empresa é formada por um conjunto de elementos interconectados com uma meta em comum, a restrição do sistema deve ser definida como qualquer coisa que impeça um sistema de atingir um maior desempenho em relação a sua meta (GOLDRATT, 1990).

Corbett (2005), salienta que todo sistema tem que ter pelo menos uma restrição, pois, caso contrário, o desempenho do sistema teria que ser infinito. Da mesma forma, sempre haverá muitas poucas restrições, como numa corrente há sempre um único elo mais fraco.

Baseado nisso, a TOC fornece cinco passos que devem ser seguidos para se garantir uma efetiva melhoria contínua:

- a) Identificar a(s) restrição(ões) do sistema;
- b) Decidir como explorar a(s) restrição(ões) do sistema;
- c) Subordinar tudo o mais à decisão acima;
- d) Elevar a(s) restrição(ões) do sistema;
- e) Se em um passo anterior uma restrição foi quebrada, volte à primeira etapa, mas não deixe que a inércia cause uma restrição no sistema.

Goldratt e Cox (1986), afirmam que a meta de uma empresa capitalista é ganhar dinheiro hoje e no futuro, ou seja, ela deve ser avaliada em termos do seu Lucro e do seu Retorno Sobre o Investimento (RSI). Para se julgar o impacto entre uma ação local e o Lucro e o RSI, a TOC faz uso de três medidas de desempenho:

- Ganho (G): índice pelo qual o sistema gera dinheiro através das vendas;
- Investimento (I): todo o dinheiro que o sistema investe na compra de coisas que pretende vender;
- Despesa Operacional (DO): todo o dinheiro que o sistema gasta transformando investimento em ganho.

Goldratt (1991), comenta que ganho pode ser entendido como todo o dinheiro que entra na empresa menos o que ela pagou a seus fornecedores. Esse seria o dinheiro que a empresa gerou. O dinheiro pago aos fornecedores é o dinheiro gerado por outras empresas.

Corbett (2005), apresenta algumas fórmulas que ajudam a entender e calcular o ganho, quais sejam:

$$G_u = P - CTV$$

Onde:  $G_u$  = Ganho unitário do produto;

$P$  = Preço de venda do produto;

$CTV$  = Custo Totalmente Variável, isto é, o custo que varia para cada acréscimo de uma unidade nas vendas do produto.

Para se conhecer o ganho total que um produto pode gerar à empresa, deve-se multiplicar o ganho unitário do produto pela quantidade vendida daquele produto, como segue:

$$GT = G_u \cdot q$$

Onde:  $GT$  = Ganho Total;

$q$  = quantidade vendida no período.

O Ganho Total da Empresa passa a ser então o somatório dos GT de todos os produtos da empresa.

De acordo com a equação (7), para se calcular o Ganho unitário de um produto tem-se que subtrair do preço de venda seu CTV.

Se o valor do preço de venda de um item é uma informação reconhecidamente útil e amplamente utilizada, o mesmo não se pode dizer do CTV. O ganho tem dois lados, o da receita e dos custos totalmente variáveis (CTV). O uso dos termos ‘custo’ e ‘variável’ pode levar-nos a fazer confusão com as medidas da contabilidade de custos.

O fundamental aqui, para dirimir qualquer dúvida, é a palavra totalmente. Totalmente variável em relação às unidades vendidas, isto é, um CTV é aquele montante despendido quando um produto a mais é vendido. O exemplo mais claro de CTV são os custos de matéria-prima” (CORBETT, 2005). Schragenheim (2001), reforça que a definição de ganho não inclui os custos com mão-de-obra direta (ou mesmo indireta), a menos que estes sejam recompensados por peça.

O autor lembra ainda que as despesas operacionais, na quais estão inclusos todos os demais custos (tudo o que não for CTV é despesa operacional) são deduzidos após o ganho ser calculado, não simultaneamente a ele.

Vale ressaltar ainda dois importantes aspectos em relação às medidas Investimento (I) e Despesa Operacional (DO) e à parcela CTV do Ganho. Para eliminar a geração de lucros aparentes permitida pelo processo de alocação de custos, o valor atribuído ao estoque em processo e estoque de produto acabado é igual ao CTV, isto é, o preço que foi pago aos fornecedores pelo material que faz parte do produto.

Assim, não é possível aumentar os estoques em processo e de produtos acabados para aumentar o lucro do período, adiando o reconhecimento de alguns custos.

Esta é a principal diferença entre o Investimento como medida da TOC e o ativo da contabilidade tradicional (CORBETT, 2005). Ainda que os custos não sejam rateados aos produtos, isto não quer dizer que tais custos sejam ignorados pela TOC.

Eles entram na terceira medida, a Despesa Operacional. Corbett (2005), salienta, entretanto, que a DO não é fixa. “A TOC não classifica as despesas em fixas ou semi-variáveis, o que importa é se é totalmente variável (quando então é classificada no CTV) ou não totalmente variável (quando então são classificadas na DO). Quando vamos tomar uma decisão na TOC precisamos medir o impacto dessa decisão nas três medidas; é nessa hora que analisamos se a DO vai variar ou não, sempre caso a caso” (CORBETT, 2005). Segundo Goldratt (1991), a

relação entre as três medidas (G, I e DO) financeiras da TOC e Lucro Líquido (LL) e Retorno Sobre o Investimento (RSI) torna-se imediata. O LL nada mais é que o Ganho subtraído das Despesas Operacionais, enquanto o RSI é o Ganho menos as Despesas Operacionais dividido pelo Investimento. Desta forma, tornam-se claras as conexões entre decisões locais medidas via G, I e DO e desempenhos globais, eliminando o conflito inicialmente anunciado.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Como dito na introdução o presente trabalho foi realizado por meio de estudo de caso, sendo que esta metodologia de pesquisa utiliza geralmente dados qualitativos, coletados a partir de eventos reais, com o objetivo de explicar, explorar ou descrever fenômenos atuais inseridos em seu próprio contexto, capaz então de fornecer conhecimentos profundos (FONSECA, 2002). Para tanto, inicialmente foi feito levantamento de dados disponíveis em livros e artigos, e posteriormente o trabalho seguiu fazendo uma análise nos estudos comparativos entre duas ferramentas de corte diferentes usadas nos processos de usinagem com tornos, que são as pastilhas de metal duro e as de aço rápido, para determinar qual a opção possui maior viabilidade em termos de produção com menor custo, maior flexibilidade e qualidade no processo de usinagem com o intuito de identificar qual das ferramentas gera uma maior flexibilidade e qualidade no processo usinagem, fazendo com que a peça tenha um melhor acabamento final, bem como qual das ferramentas fornece a possibilidade de produção com menor custo final. O estudo de caso foi realizado no Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS, situado na cidade de Varginha-MG no período outubro de 2019.

#### **3.1 Descrição da empresa**

Localizado na cidade de Varginha-MG o Centro Universitário do Sul de Minas abrange uma área de 150 mil m<sup>2</sup>, onde no seu interior contém salas e laboratórios de primeira e equipamentos sofisticados para atender todas as demandas dos alunos.

#### **3.2 Descrição do objeto de estudo**

O estudo desenvolvido no decorrer do trabalho, transmite a compreensão do objeto de estudo e a interpretação dos resultados obtidos. As grandezas envolvidas são padronizadas

(ABNT), de modo que os princípios usados nas máquinas e ferramentas permitem obter as superfícies desejadas.

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas.

- **Objetivo da observação do item**

O objetivo deste trabalho é propor metodologia para otimizar e gerenciar o processo de usinagem, em cenário de fabricação flexível e custeio baseado em atividades, criando e definindo alguns parâmetros de corte, como referência de condições operacionais introduzidas. E de fato demonstrar através de um estudo de caso comparativo, qual das ferramentas gera uma maior flexibilidade e qualidade no processo usinagem. Assim, pretende-se contribuir com os procedimentos existentes para a produção com menor tempo de processo e menor custo de matérias primas, demonstrando a qualidade no processo de usinagem.

- **Qual o interesse no estudo de caso**

O presente trabalho tem o objetivo geral analisar o comportamento das ferramentas utilizadas no desgaste dos materiais a serem usinados, demonstrando que é possível melhorar as aplicações e parâmetros de corte, onde o material demonstra uma melhor forma, e se obtém um bom produto final de acordo com os padrões exigidos, e concluindo o melhor custo e benefício.

- **Parâmetro que devem ser seguidos (normas e regulamentos)**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) torna públicas a homologação e a publicação. Listadas a seguir, as normas utilizadas para o desenvolvimento desse projeto, que foram aprovadas por consenso das partes envolvidas.

NBR 11406 de 11/1990 - ABNT/CB- 060 - Ferramentas de corte para usinagem – Terminologia.

Objetivo - Esta Norma define os termos relativos de ferramentas de corte de usinagem.

ABNT NBR 6175:1971 ABNT/CB-60 - Processos mecânicos de usinagem.

Objetivo - Estabelece a nomenclatura, a definição e a classificação dos processos mecânicos de usinagem. A classificação das ferramentas e máquinas-ferramenta é feita de acordo com as operações que cada uma executa. As operações com os metais, distinguem-se duas classes de trabalho: processo mecânico de usinagem e processo mecânico de conformação. Define as operações de usinagem, de forma a estabelecer as bases para as normas de ferramentas e máquinas-ferramenta.

INSTITUTO ALEMÃO DE NORMALIZAÇÃO - DIN 8580/2003 - Processo de fabricação, termos e definições.

Objetivo - Aplica-se a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco.

- **Funcionalidade**

A operação que confere à peça e forma, dimensões ou acabamento superficial, ou ainda uma combinação destes, através da remoção de material sob a forma de cavaco. A remoção de material ocorre através da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência muito superior à do material da peça. O Estudo da usinagem é baseado na mecânica (cinemática, atrito e deformação).

### **3.3 Planejamento do produto**

O estudo de caso foi realizado em vários corpos de prova padronizados em sua composição e em suas medidas. Os testes a serem feitos são os procedimentos mais comuns em um processo de usinagem de uma peça. São eles o desbaste longitudinal e o faceamento (desbaste transversal). Todos os corpos de prova serão submetidos aos experimentos em uma única máquina-ferramenta por questões de fidelidade de dados.

Todos os procedimentos serão realizados utilizando os parâmetros de usinagem, tais como velocidade de corte, rotação, profundidade de corte e avanço mais recomendados de acordo com o material e medidas da peça e da ferramenta a ser utilizada.

Abaixo será citado os materiais e ferramentas utilizados que foram utilizados no decorrer do estudo de caso.

## **Pastilha de Metal Duro**

**Pastilha De Metal Duro** é produzida e comercializada em inúmeros modelos e formas. O metal duro, nada mais é, do que um pó metalúrgico que se compõe de partículas duras que são altamente rígidas e resistentes a qualquer tipo de desgaste. Essas partículas duras são encontradas em nitrato de titânio, tungstênio, nióbio e tântalo. No mercado, esses metais podem ser encontrados como Pastilha De Metal Duro e, no serviço de usinagem, ela é utilizada em processos como torneamento externo e interno, fresamento, perfis especiais de insertos, de PCD, CBN, CVD ou PVD, dentre outros.

### **As vantagens e os tipos**

Muito utilizada no segmento de usinagem, a Pastilha De Metal Duro pode ser encontrada em modelos e tamanho diversificados.

- Pastilha De Metal Duro para canal
- Pastilha De Metal Duro para rosca;
- Pastilha De Metal Duro para C.B.N – (Nitreto Cúbico de Boro) indicado para insertos;
- Pastilha De Metal Duro para P.C.D – (Diamante Policristalino) indicado para materiais metálicos não ferroso.

Esses são apenas alguns modelos de Pastilha De Metal Duro e além dessa diversidade, a pastilha apresenta algumas vantagens, tais como:

- Corte durável - mesmo submetido ao calor excessivo, durante o processo de usinagem, o corte do instrumento não é prejudicado;
- Resistência – a pastilha apresenta grande resistência ao desgaste;
- Tenacidade – a tenacidade da Pastilha De Metal Duro é conseguida pela utilização de suportes especiais.

Figura 6 - Classificação das Pastilhas de Metal Duro.

## Classificação das pastilhas de metal duro segundo a norma ISO

Grupo de usinagem	Sub-grupo de usinagem	Propriedades	
		Tenacidade	Resistência ao desgaste
<b>P</b>	P10	-	+
	P20	↕	↕
	P30		
	P40		
	P50		
		+	-

Grupo de usinagem	Sub-grupo de usinagem	Propriedades	
		Tenacidade	Resistência ao desgaste
<b>M</b>	M10	-	+
	M20	↕	↕
	M30		
	M40		
		+	-

Grupo de usinagem	Sub-grupo de usinagem	Propriedades	
		Tenacidade	Resistência ao desgaste
<b>K</b>	K10	-	+
	K20	↕	↕
	K30		
	K40		
		+	-

Fonte: (MITSUBISHI MATERIALS, 2019)

### Como são classificados os insertos de metal duro

Regulamentados pela ISO (*International Organization for Standardization*), os insertos de metal duro são classificados por grupos que levarão em consideração sua aplicação em usinagem de metais, cavacos e materiais (WFER,2019).

### **Grupo K**

Consiste em ser o primeiro tipo de metal duro que será desenvolvido, levando em consideração o cavaco, que pode ser curto ou de ruptura. Entende-se por de ruptura o cavaco que é feito de ferro fundido ou de latão.

### **Grupo M**

Neste grupo, o inserto de metal duro é utilizado em cavacos curtos ou longos e de aço inoxidável.

### **Grupo P**

São insertos para os cavacos longos. Podem ser aplicados em qualquer tipo de aço.

### **Dicas para escolher seus insertos de metal duro**

Destacando os pontos que devem ser levados em consideração durante a escolha de seus insertos de metal duro. No entanto, contar com uma assistência especializada fará toda a diferença. O mais importante é identificar o inserto com base em qual tipo de cavaco. Leve em consideração também o formato que tem a pastilha com base na seleção realizada pelo porta-ferramenta. A base para ser assertivo está em realizar cálculos precisos que determina qual será a profundidade do corte e o comprimento medido na aresta de corte (WFER,2019).

### **Pastilhas de Aço Rápido**

As pastilhas de aço rápido (Bits) quadrados/redondos, são ferramentas de corte e desbaste, utilizados na usinagem. Permite a afiação para as mais variadas aplicações. Fabricados em AçoHSS-M2 e com 10% de cobalto, proporcionando maior resistência a altas temperaturas e ao desgaste sem perder o corte. Permite a usinagem em aços de alto, médio, baixo carbono, aço inox e fofo.

O aço rápido, assim é denominado por conta da rapidez observada em seu uso como cortante de aços carbono, inoxidáveis e outros, garantindo seu emprego como artigo usual de

usinagem em cortes, prensas e acabamentos gerais dentro dos serviços de usinagem. Os **Bits De Aço Rápido** são altamente utilizados dentro do segmento de usinagem, sendo necessários para aplicações de ajustes, prensas, moldantes e outras tantas aplicações do gênero. Os serviços de usinagem em que são empregados os Bits De Aço Rápido lidam diretamente com maquinário pesado e ferramentas de igual proporção, de forma que a garantia de que os melhores materiais estão sendo utilizados é uma maneira de agregar segurança aos processos inerentes. (FERMEC,2019).

São utilizados com os padrões DIN4964 com tolerância H14, dureza 63 a 67HRC.

Figura 7 - Especificações do Aço Rápido.



Código HSS 50% Co	BITOLA (pol.)	C. TOTAL (pol.)	Código HSS 50% Co	BITOLA (pol.)	C. TOTAL (pol.)
50001	3/16	2.1/2	50022	3/8	6
50002	3/16	3	50023	3/8	8
50003	3/16	4	50024	7/16	4
50004	3/16	6	50025	7/16	6
50005	1/4	2.1/2	50026	1/2	4
50006	1/4	3	50027	1/2	5
50007	1/4	4	50028	1/2	6
50008	1/4	5	50029	1/2	8
50009	1/4	6	50030	5/8	4.1/2
50010	1/4	8	50031	5/8	5
50011	5/16	2.1/2	50032	5/8	6
50012	5/16	3	50033	5/8	8
50013	5/16	4	50034	3/4	5
50014	5/16	5	50035	3/4	6
50015	5/16	6	50036	3/4	8
50016	5/16	8	50037	7/8	6
50018	3/8	3	50038	7/8	8
50019	3/8	3.1/2	50039	1	6
50020	3/8	4	50040	1	8
50021	3/8	5			

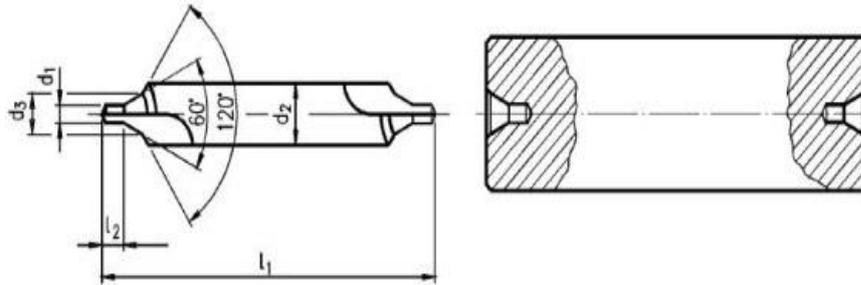
Fonte: (FERMEC, 2019)

### Brocas de centro HSS

A broca de centro HSS é utilizada para marcação de furo de centro em peças que exijam furos concêntricos. Possibilidade de fazer furos concêntricos em uma só operação.

Pode ser usado em ambos os lados e permite a redução do tempo de furação.

Figura 8 - Operação broca de centro.



Fonte: (BVKMÁQUINAS, 2019)

## Mandril

O mandril é um dos principais componentes de ferramentas utilizadas para furar, tornear, desbastar e parafusar peças. É muito utilizado, portanto, em furadeiras, marteletes, fresadoras, retíficas, tornos mecânicos e outros equipamentos. Onde é presa a broca de centro para realizar o furo de centro na peça.

Figura 9 – Mandril.



Fonte: (WURTH, 2019)

## Cabeçote Móvel (Contraponto)

Cabeçote-Móvel ou contraponto, é a parte do torno onde se desloca sobre o barramento oposto ao cabeçote fixo, o contraponto e o eixo principal e estão situados na mesma altura e determina o eixo de rotação da superfície torneada. Também é utilizado para apoiar peças longas e pesadas suportando um peso muito acima do que apenas fixada no cabeçote fixo, além de exercer furação com brocas.

Figura 10 - Cabeçote móvel (Contraponto).

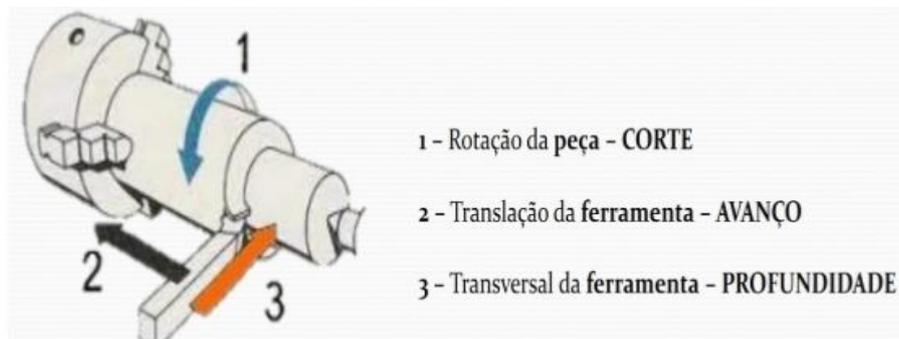


Fonte: (STANDARD, 2019)

## Torno mecânico horizontal

O torno mecânico é uma máquina-ferramenta que permite usinar peças de forma geométrica de revolução. Estas máquinas-ferramenta operam fazendo girar a peça a usinar presa em um cabeçote placa de 3 ou 4 castanhas, está tendo as castanhas individuais, ou fixadas entre os contrapontos de centragem enquanto uma ou diversas ferramentas de corte são pressionadas em um movimento regulável de avanço de encontro à superfície da peça, removendo material, chamado cavaco, de acordo com as condições técnicas adequadas. É uma máquina operatriz extremamente versátil utilizada na confecção ou acabamento em peças. Para isso, utiliza-se de placas para fixação da peça a ser trabalhada. Essas placas podem ser de três castanhas, se a peça for cilíndrica, ou quatro castanhas, se o perfil da peça for retangular.

Figura 11 - Processo de torneamento.



Fonte: (SENAI-MG, 2016)

Esta máquina-ferramenta permite a usinagem de variados componentes mecânicos: possibilita a transformação do material em estado bruto, em peças que podem ter seções circulares, e quaisquer combinações destas seções.

Basicamente é composto de uma unidade em forma de caixa que sustenta uma estrutura chamada cabeçote fixo. A composição da máquina contém ainda duas superfícies orientadoras chamadas barramentos, que por exigências de durabilidade e precisão são temperadas e retificadas. O barramento é a base de um torno, pois sustenta a maioria de seus acessórios, como lunetas, cabeçote fixo e móvel, etc. Para movimentos longitudinais, um torno básico tem um carro principal e um carro auxiliar para movimentos precisos e para movimentos horizontais um carro transversal (SENAI-MG 2016).

Através deste equipamento é possível confeccionar eixos, polias, pinos, qualquer tipo possível e imaginável de roscas, peças cilíndricas internas e externas, além de cones, esferas e os mais diversos e estranhos formatos.

Com o acoplamento de diversos acessórios, alguns mais comuns, outros menos, o torno mecânico pode ainda desempenhar as funções de outras máquinas ferramentas, como fresadora, plaina, retífica ou furadeira.

Pelo desenvolvimento do torno mecânico, a humanidade adquiriu as máquinas necessárias ao seu crescimento tecnológico, desde a medicina até a indústria espacial. O torno mecânico é a máquina que está na base da ciência metalúrgica, e é considerada a máquina ferramenta mais antiga e importante ainda em uso.

São máquinas que executam trabalhos de torneamento destinados a remover material da superfície de uma peça em movimento de rotação por meio de uma ferramenta de corte que se desloca continuamente.

Figura 12 - Torno mecânico horizontal.

## Constituintes de um torno



Fonte: (ABIMÁQIOMAS, 2018)

### Aço SAE 1020

O Aço SAE 1020 é um dos aços ao carbono mais comum utilizado como aço para cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços mais ligados para o mesmo propósito. Possui excelente plasticidade e soldabilidade. Após cementação é beneficiado, mas possui menor capacidade de endurecimento, comparado com o GGD 862. Aplicações dos aços SAE 1020, é utilizado em componentes mecânicos de uso como engrenagens, eixos, virabrequins, eixos-comando, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capas. Aços SAE 1020 são aços de boa soldabilidade, boa forjabilidade, baixa resistência mecânica e baixa usinabilidade. Condições de fornecimento do aço SAE 1020, barras laminadas sem acabamento mecânico, barras laminadas trefiladas, barras laminadas descascadas polidas, barras laminadas retificadas, barras forjadas, barras laminadas trefiladas com comprimento fixo (trefila própria) (AÇOPORTE,2017).

### Especificações técnicas do aço SAE 1020

Características e propriedades mecânicas dos aços SAE 1020, os aços SAE são: Aços carbonos de ligas metálicas constituídas basicamente de ferro, carbono, silício e manganês,

apresentando também outros elementos inerentes ao processo de fabricação, em percentuais controlados. O aço carbono SAE 1020 é um dos aços mais utilizados, devido a sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Este tipo de Aço SAE1020 pode ser aplicado de diversas formas com cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços utilizados para o mesmo propósito. A microestrutura presente neste aço no seu estado normalizado é perlita fina e ferrita (GERDAU,2018).

Tabela 1 - Propriedades do Aço Carbono

<b>AÇO SAE</b>	<b>% CARBONO</b>	<b>% Manganês</b>	<b>% Silício</b>	<b>P%(Max)</b>	<b>S%(Max).</b>
<b>1020</b>	0,23	0,45	0,21	0,04	0,05
<b>1045</b>	0,43	0,7	0,2	0,04	0,05
<b>1060</b>	0,62	0,9	0,21	0,04	0,05
<b>1070</b>	0,7	0,75	0,23	0,04	0,05
<b>1080</b>	0,93	0,75	0,23	0,04	0,05

Fonte: (GALVAÇO, 2017)

### **Onde usar o AÇO SAE 1020**

O Aço SAE é indicado para parafusos, trefilados duros, chassis, discos de roda, peças em geral para máquinas e veículos submetidos a esforços pequenos e médios. O Aço SAE 1020 altamente tenaz, particularmente indicado para fabricação de peças que devam receber tratamento superficial para aumento de dureza, principalmente cementação. O Aço SAE 1020 é utilizado ainda para eixos em geral, forjados. Para que o Aço SAE 1020 possua estas características, ele deve seguir composições químicas específicas. Os Aços SAE 1020 têm Baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Pode ser aplicado em cementação. Os Aços SAE 1020 têm como Aplicação ideal para produtos como Parafusos, pregos, eixos, componentes forjados sem maiores exigências, barra de distribuição, peça cementada, tubos soldados.

Figura 13 - Barras de aços trefilados SAE 1020 ½”.



Fonte: (METALNEC, 2019).

### **Parâmetros de corte**

Parâmetros de corte são grandezas numéricas que representam valores de deslocamento da ferramenta ou da peça, adequados ao tipo de trabalho a ser executado, ao material a ser usinado e ao material da ferramenta.

Os parâmetros ajudam a obter uma perfeita usinagem por meio da utilização racional dos recursos oferecidos por determinada máquina-ferramenta.

Para uma operação de usinagem, o operador considera principalmente os parâmetros: Velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, área de corte, pressão específica de corte, força de corte e potência de corte

A determinação desses fatores depende de muitos fatores: o tipo de operação, o material a ser usinado, o tipo de máquina-ferramenta, a geometria e o material da ferramenta de corte. Além disso, os parâmetros se inter-relacionam de tal forma que, para determinar um, geralmente, é necessário conhecer os outros.

Velocidade de corte dependendo da operação, a superfície da peça pode ser deslocada em relação à ferramenta, ou a ferramenta é deslocada em relação à superfície da peça. Em ambos os casos, tem-se como resultado o corte, ou desbaste do material. Para obter o máximo rendimento nessa operação, é necessário que, tanto a ferramenta quanto a peça desenvolvam

velocidade de corte adequada. Velocidade de corte é o espaço que a ferramenta percorre, cortando um material dentro de um determinado tempo.

Vários fatores influenciam na velocidade de corte: tipo de material da ferramenta; tipo de material a ser usinado; tipo de operação que será realizada; condições de refrigeração; condições da máquina.

Nas máquinas-ferramenta em que o movimento de corte é produzido pela rotação da ferramenta ou da peça, determina-se o número de rotações por minuto (n) através de cálculo, ou com auxílio de gráficos ou diagramas. Depende da velocidade de corte (Vc) determinada pelas condições de usinagem e pelo diâmetro (d) da peça ou ferramenta, e é expressa em rotações por minuto:

Tabela 2 - Velocidade de corte no torno.

<i>Tabelas Relativas à Velocidade de Corte no Torno</i>					
<i>Tabelas como as que se seguem, permite determinar a velocidade de corte para cada caso, conhecidos os fatores vistos anteriormente.</i>					
<i>Conhecida a velocidade de corte, pode-se encontrar a rotação por minuto (rpm), por cálculos ou em tabelas</i>					
<i>Tabela de Velocidade de Corte (Vc) para o torno (em metros por minuto)</i>					
<i>Materiais</i>	<i>Ferramenta de Aço Rápido</i>			<i>Ferramentas de Carboneto Metálico</i>	
	<i>Desbaste</i>	<i>Acabamento</i>	<i>Roscar e Recartilhar</i>	<i>Desbaste</i>	<i>Acabamento</i>
<i>1020 - 1030 Aço Carbono Macio</i>	25	30	10	200	300
<i>1045 - 1050 Aço Carbono Duro</i>	15	20	8	120	160
<i>1060 - 1070 Aço Carbono Extraduro</i>	12	16	6	40	60
<i>Ferro Fundido Maleável</i>	20	25	8	70	85
<i>Ferro Fundido Cinzento</i>	15	20	8	65	95
<i>Ferro Fundido Duro</i>	10	15	6	30	50
<i>Bronze</i>	30	40	10 a 25	300	380
<i>Latão e Bronze</i>	40	50	10 a 25	350	400
<i>Alumínio</i>	60	90	15 a 35	500	700
<i>Fibra e Ebonite</i>	25	40	10 a 20	120	150

Fonte: (SENAI-MG, 2016)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os objetivos do estudo de caso foram: avaliar a influência das estratégias de usinagem tendo o tempo e o acabamento superficial, melhor custo e benefício, qualitativo do equipamento apropriado, foram avaliados apenas os tempos de operação, como: desgaste, processo de usinagem, remoção de cavacos e sobre eles pode-se concluir o seguinte:

A pastilha de metal duro é muito mais eficiente que a pastilha de aço rápido. Ela transmite um melhor tempo de resposta, apresenta um melhor acabamento superficial e produz uma grande vida útil, comparada a outra ferramenta de corte.

Com essas referências, nota-se que a pastilha de metal duro apresenta:

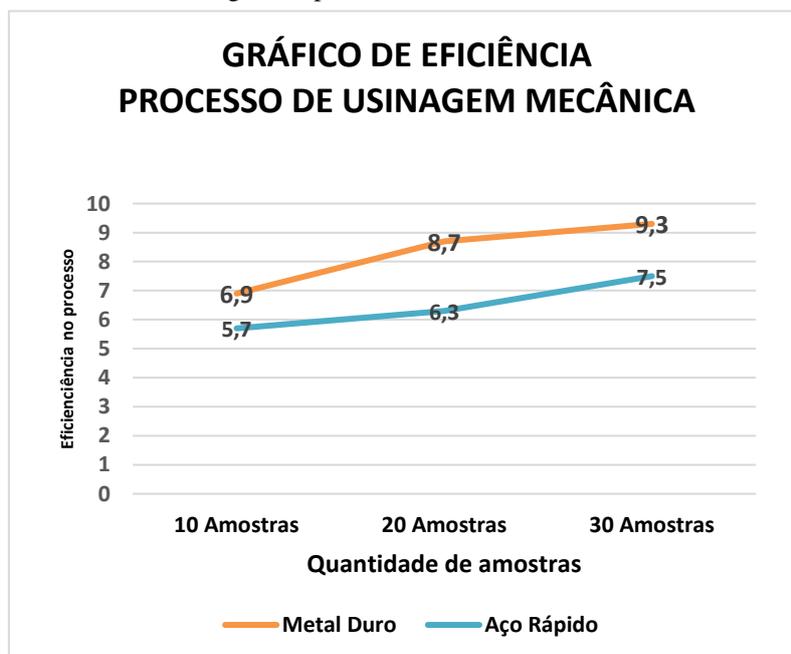
Corte durável - mesmo submetido ao calor excessivo, durante o processo de usinagem, o corte do instrumento não é prejudicado;

Resistência – a pastilha apresenta grande resistência ao desgaste;

Tenacidade – a tenacidade da Pastilha De Metal Duro é conseguida pela utilização de suportes especiais.

Conforme a amostragem, demonstra o comparativo entre as duas ferramentas utilizadas. A pastilha de metal duro tem a melhor eficiência apresentada, realizadas com 30 amostras usinadas.

Gráfico 1 - Amostragem do processo



Fonte: (O autor).

## Materiais utilizados

Figura 14 - Pastilha de metal duro



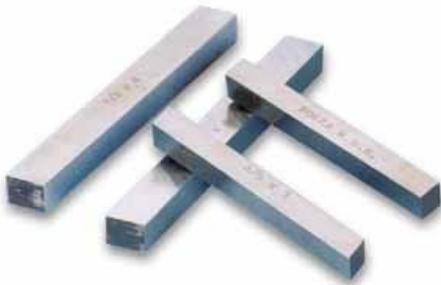
Fonte: (FERMEC, 2019)

Figura 15 - Suporte e pastilha de metal duro.



Fonte: (O autor)

Figura 16 - Bits (Aço-Rápido).



Fonte: (FERMEC, 2019)

Figura 17 - Suporte e aço rápido.



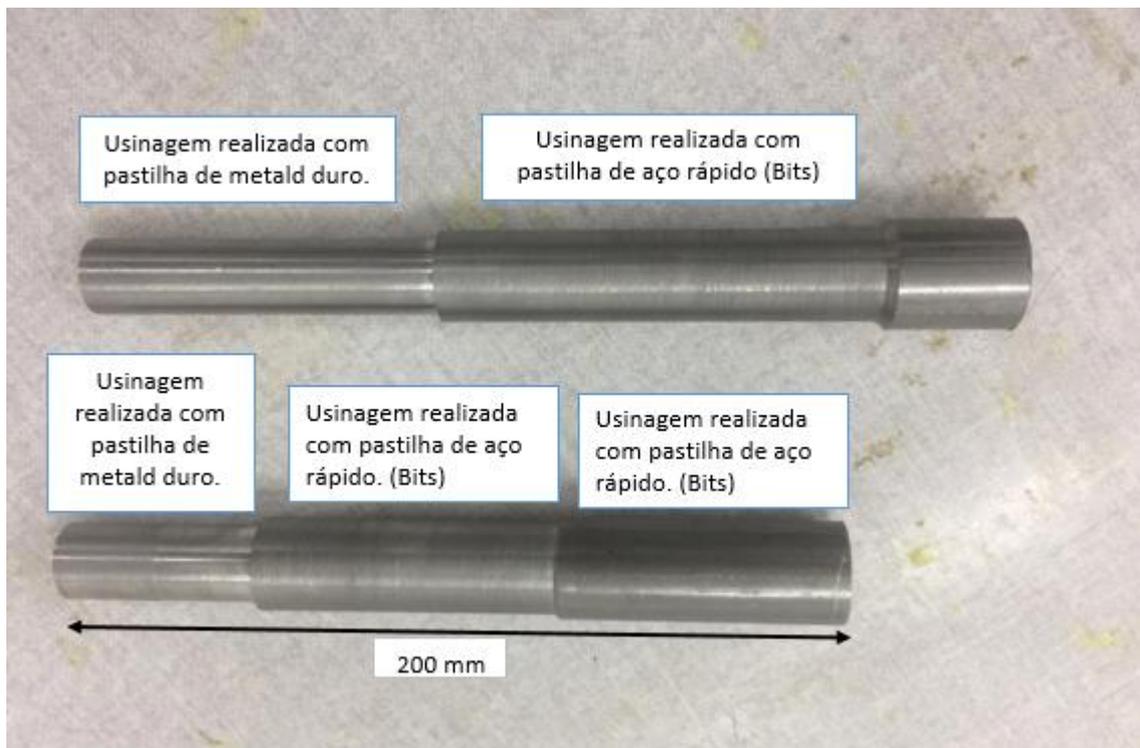
Fonte: (O autor)

Figura 18 - Corpos de prova - Aço SAE 120 ½”



Fonte: (O autor)

Figura 19 - Corpos de provas usinados.



Fonte: (O autor)

Figura 20 - Corpos de provas, comparativos de ferramentas.



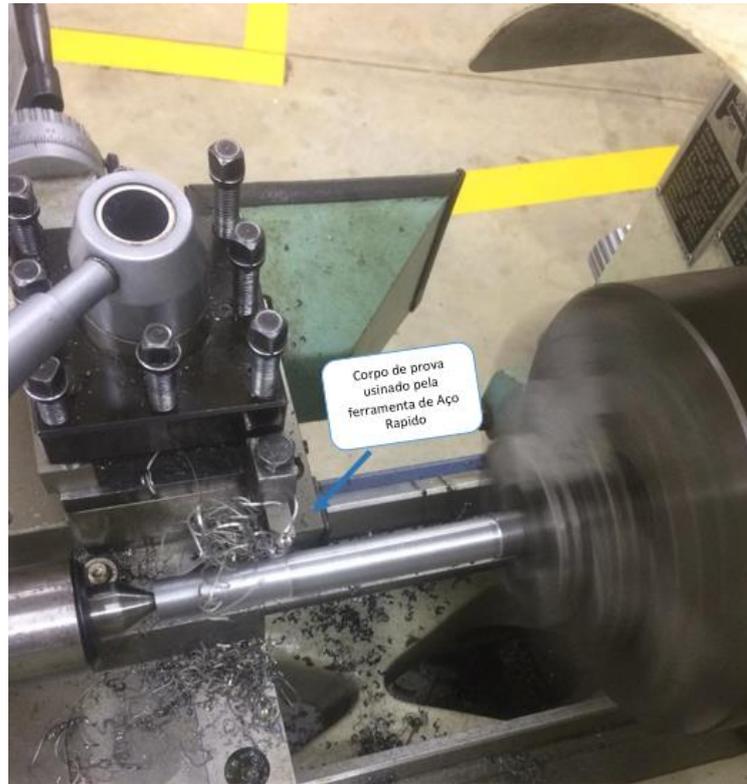
Fonte: (O autor)

Figura 21 - Corpos de provas, comparativos de ferramentas.



Fonte: (O autor)

Figura 22 - Desbaste longitudinal – Aço Rápido.



Fonte: (O autor)

Figura 23 - Desbaste longitudinal – Aço Rápido.



Fonte: (O autor)

Figura 24 - Usinagem corpo de prova – Metal Duro



Fonte: (O autor)

Figura 25 - Usinagem corpo de prova – Metal Duro.



Fonte: (O autor)

Figura 26 - Torno Convencional Horizontal.



Fonte: (O autor)

Figura 27 - Controle de Rotação.



Fonte: (O autor)

## 5 CONCLUSÃO

As atividades relacionadas à usinagem estão presentes em amplo espaço nas indústrias de grande porte, ou até mesmo em pequenas fábricas. Como visto nesta pesquisa os conhecimentos sobre os fundamentos da usinagem dos metais proporcionam a otimização nos processos de usinagem e permitem, dentre tantas vantagens, a redução dos custos do processo e o aperfeiçoamento do trabalho.

Muitas indústrias manufatureiras têm optado pela otimização dos processos de usinagem devido a busca por melhores desempenho, focando principalmente na redução de custos e de tempos de fabricação. Diante ao exposto, o objetivo geral deste trabalho foi realizar um levantamento bibliográfico e um estudo de caso sobre os caminhos para a otimização dos processos de usinagem, com enfoque na pesquisa sobre as principais ferramentas de corte e sobre os parâmetros de usinabilidade mais utilizados nesse processo.

Através do estudo de caso constatou-se que a pastilha de metal duro é muito mais eficiente que a pastilha de aço rápido. Ela transmite um melhor tempo de resposta, apresenta um melhor acabamento superficial e produz uma grande vida útil, comparada a outra ferramenta de corte.

## REFERÊNCIAS

- AÇOPORTE - AÇO SAE 1020. Disponível em: <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1020>>. Acesso em: 22 ago. 2019.
- AGUIRRA MAQUINAS – Acessórios torno mecânico. Disponível em: <<http://www.aguirramaquinas.com.br/acessorios.html>>. Acesso em: 23 ago. 2019.
- AHRENS, Carlos H. LENCINA, Diovani; BEAL, Valter E.; FRAGA, Marcelo. **Considerações iniciais para a confecção de protótipos rápidos**. Anais do 1º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (em compact disc) Curitiba, abril de 2001.
- ANANTHASURESH, G. K.; KOTA, S. Designing compliant mechanisms. **ASME Mechanical Engineering**, 1995. v. 117, p. 93–96, 1995.
- ANANTHASURESH, G. K.; KOTA, S.; GIANCHANDANI, Y. **A methodical approach to the design of compliant micromechanisms**. SOLID-STATE SENSOR AND ACTUATOR WORKSHOP, 1994. p. 189–192, 1994.
- BAPTISTA, E. A. **Desenvolvimento de um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem baseado na WEB**. Santa Bárbara d'Oeste: FEU, UNIMEP, 2004. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, 2004.
- BUSCH-VISHNIAC, I. J. **Electromechanical Sensors and Actuators**. [S.l.]: Springer Verlag, 1998.
- CARDOSO, E. L.; FONSECA, J. S. **Intermediate density reduction and complexity control in the topology optimization**. In: In: 20TH IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING (CILAMCE99). [S.l.: s.n.], 1999.
- CARDOSO, E. L.; FONSECA, J. S. Strain energy maximization approach to the design of fully compliant mechanisms using topology optimization. **Latin American Journal of Solids and Structures**, 2004. v. 1, p. 263–275, 2004.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento**. 2. Ed. São Paulo: Pearson, 1986.
- CLASSIFICAÇÃO DAS PASTILHAS DE METAL DURO SEGUNDO A NORMA ISO Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/classificacao-das-pastilhas-de-metal-duro-segundo-a-norma-iso/4810836/>>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- COELHO, R. T. **Otimização de sobremetal para torneamento e retificação cilíndrica de peças forjadas**. São Carlos: EESC-USP, 1999. 156f. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
- CORBETT, T. **Bússola Financeira: O processo decisório da Teoria das Restrições**. 1 a ed. São Paulo: Nobel, 2005, 208p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: mm editora, 2001, 244p.

FERMEC – **Pastilhas de metal duro para usinagem**. Disponível em: <<http://www.fermec.com.br/usinagem/pastilhas-metal-duro-usinagem.php>>. Acesso em: 23 ago. 2019.

FERMEC – **Bits de aço rápido**. Disponível em: <<http://www.fermec.com.br/usinagem/bits-aco-rapido.php>>. Acesso em: 23 ago. 2019.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977, 751p.

FONSECA, João José Saraiva da. **Metodologia da pesquisa científica**. Ceará: Universidade Estadual do Ceará, 2002.

FRECKER, M. I.; KIKUCHI, N.; KOTA, S. **Optimal synthesis of compliant mechanisms to satisfy kinematic and structural requirements - preliminary results**. In: PROCEEDINGS OF THE 1996 ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES AND COMPUTERS IN ENGINEERING CONFERENCE. [S.l.: s.n.], 1996. p. 177–192.

GOLDRATT, E. M. **A síndrome do palheiro: garimpendo informação em um oceano de dados**. Educator: São Paulo, 1991.

GOLDRATT, E. M. **What is thing called the Theory of Constraints, and how should it be implemented**. Crotonon-Hudson: North River Press, 1990.

GOLDRATT, E.M.; COX, J. **A meta: um processo de aprimoramento contínuo**. São Paulo: IMAM, 1986.

HER, I.; MIDHA, A. A compliance number concept for compliant mechanisms and type synthesis. **Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Transaction of the ASME**, 1987. v. 109, p. 348–355, 1987.

HOWELL, L. L.; MIDHA, A. A loop-closure theory for the analysis and synthesis of compliant mechanisms. **Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME**, 1996. v. 118, p. 121–125, 1996.

KAMINISE, Almir Kazuo. **Estudo da Influência do Material do Porta-Ferramentas Sobre Temperaturas de Usinagem no Torno**. 2012. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14725>>. Acesso em: 06 set. 2019.

KIKUCHI, N.; NISHIWAKI S.AND FONSECA, J. S. O.; SILVA, E. C. N. Design optimization method for compliant mechanisms and material microstructure. **Comput. Methods. Appl. Mech. Eng.**, 1998. v. 151, p. 401–417, 1998.

KULJANIC, E.; CUKOR, G. **Machinability testing and optimization of machining processes**. In: International scientific conference on production engineering 7th., 2001, Lumbarda. Annals... Lumbarda: Zagreb, 2001. p. I 095 – I 104.

LIN, J.; LUO, Z.; TONG, L. A new multi-objective programming scheme for topology optimization of compliant mechanisms. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2010. v. 40, p. 241–255, 2010.

LUO, J. et al. A new level set method for systematic design of hinge-free compliant mechanisms. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2008. v. 198, p. 318–331, 2008.

MALAQUIAS, J. C. **Otimização e gerenciamento em usinagem para cenário de fabricação flexível**. 2014. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’Oeste.

MIDHA, A.; NORTON, T. W.; HOWELL, L. L. **On the nomenclature and classification of compliant mechanisms**: Abstraction of mechanisms and mechanism synthesis problems, flexible mechanisms, dynamics and analysis. *In*: ASME 1992 DESIGN TECHNICAL CONFERENCES, 22ND BIENNIAL MECHANISMS CONFERENCES. [S.l.: s.n.], 1992. p. 13–16.

MITSUBISHI MATERIALS – **Torneamento**. Disponível em: <[http://www.mmbr-carbide.com.br/products#turning\\_tools](http://www.mmbr-carbide.com.br/products#turning_tools)>. Acesso em: 30 ago. 2019.

MITSUBISHI MATERIALS – **Insertos de Torneamento**. Disponível em: <[http://www.mmbr-carbide.com.br/products/turning\\_tools/turning\\_insert](http://www.mmbr-carbide.com.br/products/turning_tools/turning_insert)>. Acesso em: 30 ago. 2019.

MITSUBISHI MATERIALS – **Torneamento Externo**. Disponível em <[http://www.mmbr-carbide.com.br/products/turning\\_tools/external\\_turning](http://www.mmbr-carbide.com.br/products/turning_tools/external_turning)>. Acesso em: 30 ago. 2019.

NISHIWAKI, S. et al. Topology optimization of compliant mechanisms using the homogenization method. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1998. v. 42, p. 535–559, 1998.

PARÂMETROS DE CORTE. - Disponível em: <[https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20I/Usinagem/Aula%205/Parametros\\_de\\_corte.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20I/Usinagem/Aula%205/Parametros_de_corte.pdf)>. Acesso em: 17 ago. 2019.

POULSEN, T. A. A simple scheme to prevent checkerboard patterns and one-node connected hinges in topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2002. v. 24, p. 396–399, 2002.

SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W. **Manufacturing at warp speed**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

SERVIÇO NACIONAL DE APENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Operações em Máquinas Convencionais**. Brasília: [s. n.], 2016.

SILVA, M. C. **Aplicação do Método da Otimização Topológica para o Projeto de Mecanismos Flexíveis menos suscetíveis à ocorrência de dobradiças**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

SILVA, Lindomar A. ZANIN, Maicon Jair. **Montagem de fresa CNC**. 2001. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) 65f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/538/1/MD\\_COMIN\\_2011\\_2\\_05.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/538/1/MD_COMIN_2011_2_05.pdf)>. Acesso em: 08 nov. 2019.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Fundamentos dos Processos de Usinagem**. São Paulo, [S.d.]. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202>.

WANG, F.; LAZAROV, B. S.; SIGMUND, O. On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2011. v. 43, p. 767–784, 2011.

WFER FERRAMENTAS DE CORTE - **CATÁLOGOS DE FERRAMENTAS**. Disponível em: <<https://http://www.wferferramentas.com.br/catalogo>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

WFER FERRAMENTAS DE CORTE – **INSERTOS**. Disponível em: <<https://http://www.wferferramentas.com.br/imagens/pdf/insertos.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2019.

WFER FERRAMENTAS DE CORTE – **INSETOS DE METAL DURO**. Disponível em: <<https://http://www.wferferramentas.com.br/insertos-metal-duro>>. Acesso em: 17 ago. 2019.

YOON, G. H. et al. Hinge-free topology optimization with embedded translation-invariant differentiable wavelet shrinkage. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2004. v. 27, p. 139–150, 2004.

ZHU, B.; ZHANG, X. A new level set method for topology optimization of distributed compliant mechanisms. **International Journal For Numerical Methods In Engineering**, 2012. v. 91, p. 843–871.